



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH**

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa (ESEIAAT)

TREBALL FI DE GRAU:

**ESTUDI I IMPLEMENTACIÓ DE SISTEMES
AUXILIARS EN UNA BANCADA DE PROVA DE
MOTORS COET**

Treball realitzat per Joan Costa Garcia estudiant del grau en Enginyeria en
Vehicles Aeroespacials

**Contingut:
MEMÒRIA**

**Data d'entrega:
10 DE JUNY DEL 2019**

Supervisat per:

Jaume Solé Bosquet
Manel Soria Guerrero

Agraïments

Als meus tutors, Jaume Solé Bosquet i Manel Soria Guerrero, per la seva valuosa ajuda durant la realització d'aquest projecte.

A l'empresa Texfire per la col·laboració que ha mostrat en aquest projecte a partir de l'aportació dels seus materials.

A la meva família, pel suport al llarg de tot el projecte.

A tots, gràcies.

Nomenclatura

a	Acceleració
A_{int}	Àrea interior
d	Diàmetre vis
D_{ext}	Diàmetre exterior
e	Espessor
e_1	Distància del forat del vis a l'extrem més proper de la peça
F	Força
F_b	Resistència a l'aixafament
F_{uv}	Tensió última
m	Massa
P	Pressió
T	Empenta
t	Temps
v	Velocitat
v_0	Velocitat inicial
x	Posició
x_0	Posició inicial

Índex

1	INTRODUCCIÓ	7
1.1	OBJECTIU	7
1.2	ABAST	7
1.3	REQUERIMENTS	8
1.4	JUSTIFICACIÓ I UTILITAT	9
2	ESTAT DE L'ART I ALTERNATIVES	10
2.1	ESTAT DE L'ART	10
2.1.1	Sensometria	10
2.1.2	Adquisició de dades	11
2.2	SELECCIÓ D'ALTERNATIVES	11
3	DESENVOLUPAMENT DE LA SOLUCIÓ PROPOSADA	12
3.1	ESTRUCTURA	13
3.1.1	Sistema de protecció contra els gasos d'escapament	13
3.1.2	Proteccions contra fallada de motor	15
3.2	ELECTRÒNICA	20
3.2.1	Característiques de la cèl · lula de càrrega LCS-D1	20
3.2.2	Components electrònics	21
3.2.3	Esquema de connexions	25
3.2.4	Codi Arduino	27
3.2.5	Lectura del port sèrie (PuTTY)	30
3.2.6	Calibratge de la cèl · lula de càrrega LCS-D1	30
3.2.7	Especificacions de la electrònica amb la cèl · lula de càrrega LCS-D1	34
3.3	PROVA ESTÀTICA N°1	34
3.3.1	Elecció del motor	34
3.3.2	Resultats	36
3.3.3	Conclusions	37
3.4	MODIFICACIONS	38
3.4.1	Característiques de la cèl · lula de càrrega FX1901	38
3.4.2	Esquema de connexions	39
3.4.3	Estructura	39
3.4.4	Calibratge de la cèl · lula de càrrega FX1901	40
3.4.5	Especificacions de la electrònica amb la cèl · lula de càrrega FX1901	43
3.5	PROVA ESTÀTICA N°2	44

3.5.1	Elecció del motor	44
3.5.2	Resultats	44
3.5.3	Conclusions	45
4	RESULTATS	46
4.1	RESUM ECONÒMIC	46
4.1.1	Cost tècnic de redacció del projecte	46
4.1.2	Cost d'execució del projecte	47
4.2	IMPLICACIONS AMBIENTALS	48
4.2.1	Material ignífug	48
4.2.2	Components electrònics	49
4.2.3	Combustió motor de coet	49
4.3	PLANIFICACIÓ I PROGRAMACIÓ	49
4.4	CONCLUSIONS I RECOMANACIONS	50
A	Codi Arduino	51
B	Codi MATLAB per a imprimir resultats	55
C	Taula d'errors del calibratge	57
D	Diagrama de Gantt	59
E	Plànols	61
F	Guia d'utilització de la bancada	66
	Bibliografia	81

Índex de figures

3.1	Capes del material ignífug <i>WELD SX</i>	14
3.2	Material ignífug col·locat a l'estructura de la bancada.	14
3.3	Proteccions de seguretat de la bancada.	15
3.4	Dimensions de la cambra de combustió.	16
3.5	Seqüència de la simulació amb ANSYS de l'impacte de la tovera contra les proteccions.	19
3.6	Instant de deformació màxima de la protecció durant la simulació.	20
3.7	Cèl·lula de càrrega model LCS-D1.	21
3.8	Principals pins de connexió de l'Arduino MEGA 2560.	22
3.9	Amplificador diferencial.	23
3.10	Entrades amplificador diferencial.	23
3.11	Esquema electrònic de l'amplificador diferencial.	24
3.12	Esquema electrònic del AD7606.	25
3.13	Connexió estil <i>shield</i> entre l'Arudino MEGA i l'amplificador diferencial.	26
3.14	Esquema de connexions entre l'Arduino MEGA i l'ADC.	26
3.15	Esquema de cablejat de la cèl·lula de càrrega LCS-D1.	27
3.16	Sistema de calibratge.	31
3.17	Recta de calibratge de la cèl·lula LCS-D1.	32
3.18	Motor Klima D9-0.	35
3.19	Corba d'empenta teòrica del motor Klima D9-0.	36
3.20	Corba d'empenta experimental del motor Klima D9-0.	37
3.21	Cèl·lula de càrrega model FX1901.	38
3.22	Esquema de cablejat de la cèl·lula de càrrega FX1901.	39
3.23	Modificació de l'estructura.	40
3.24	Recta de calibratge de la cèl·lula FX1901.	42
3.25	Corba d'empenta experimental del motor Klima D9-0 (prova estàtica n ^o 2).	44
D.1	Diagrama de Gantt.	59
D.2	Diagrama de Gantt.	60

Índex de taules

1.1	Taula de verificació de requisits tècnics.	9
3.1	Propietats del teixit ignífug multicapa WELD SX [1].	13
3.2	Propietats de l'acer S235 [2].	18
3.3	Característiques de la cèl · lula de càrrega LCS-D1 [3].	20
3.4	Característiques de l'Arduino MEGA 2560 [4].	21
3.5	Especificacions tècniques del AD7606 [5].	24
3.6	Connexió de la cèl · lula de càrrega LCS-D1 a l'electrònica.	27
3.7	Dades obtingudes per a cada una de les masses patró (LCS-D1).	32
3.8	Error dels instruments.	33
3.9	Resum càlcul incerteses cèl · lula LCS-D1.	34
3.10	Especificacions de l'electrònica amb la cèl · lula de càrrega LCS-D1.	34
3.11	Especificacions del motor Klima D9-0 [6].	35
3.12	Característiques de la cèl · lula de càrrega FX1901 [7].	38
3.13	Connexió de la cèl · lula de càrrega FX1901 a l'electrònica.	39
3.14	Dades obtingudes per a cada una de les masses patró (FX1901).	41
3.15	Error dels instruments.	43
3.16	Resum càlcul incerteses cèl · lula FX1901.	43
3.17	Especificacions de l'electrònica amb la cèl · lula de càrrega FX1901.	43
4.1	Especificació del cost tècnic de redacció del projecte.	47
4.2	Especificació del cost d'execució del projecte.	48
C.1	Càlcul d'incerteses del calibratge de la electrònica amb la cèl · lula de càrrega LCS-D1.	57
C.2	Càlcul d'incerteses del calibratge de la electrònica amb la cèl · lula de càrrega FX1901.	58

Capítol 1

INTRODUCCIÓ

Índex

1.1	OBJECTIU	7
1.2	ABAST	7
1.3	REQUERIMENTS	8
1.4	JUSTIFICACIÓ I UTILITAT	9

1.1 OBJECTIU

L'objectiu de l'estudi consisteix en dur a terme el disseny dels elements auxiliars necessaris per completar i posar en funcionament una bancada de prova de motors de coet que es troba actualment disponible a l'Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa (ESEIAAT). Els sistemes auxiliars a desenvolupar comprenen un conjunt d'elements de seguretat passiva, sensometria i electrònica de control i emmagatzemament de dades obtingudes durant la realització de les proves de motors de coet.

1.2 ABAST

El projecte contempla les següents tasques dins del seu abast:

- Incorporar sistema de protecció contra els gasos d'escapament que previngui l'oxidació del banc.
- Justificar la eficiència de les proteccions que presenta la bancada en cas de fallada del motor.
- Adquirir, programar i instal·lar el conjunt de sistemes que conformen l'electrònica del banc.
- Realitzar una prova estàtica amb les corresponents mesures de seguretat per a comprovar el correcte funcionament de la bancada. Es realitzarà un informe de la prova a partir de les dades obtingudes.
- Realitzar estudi de l'impacte mediambiental.

- Realitzar estudi econòmic.

No es contempla la realització de les següents tasques:

- Estudi estructural de la bancada.

1.3 REQUERIMENTS

Les especificacions tècniques que regeixen el projecte s'especifiquen a continuació amb la corresponent taula de verificació (taula 1.1).

- **REQ.1.** La bancada ha de poder adaptar-se i subjectar de forma correcta i segura tot tipus de motors de coet de petita escala.
- **REQ.2.** La bancada ha de ser fàcilment transportable per a poder desplaçar-la d'una posició a una altra.
- **REQ.3.** La bancada ha de presentar les millors mesures de seguretat per evitar malmetre l'entorn o posar en perill a persones. Es contempla l'ús de barreres de protecció i subjeccions al terra.
- **REQ.4.** La bancada ha de ser segura en front a vibracions per evitar fallades estructurals durant les proves d'ignició.
- **REQ.5.** La bancada ha de presentar proteccions en contra dels gasos d'escapament per evitar malmetre l'estructura.
- **REQ.6.** La bancada ha de prendre mesures d'impuls dels motors de coet a partir d'una cèl·lula de càrrega. No es contempla la opció de mesurar pressió i temperatura a l'interior de la cambra de combustió.
- **REQ.7.** L'electrònica ha d'ajustar-se a les funcions que requereix el banc evitant fer un sobredimensionament.
- **REQ.8.** L'electrònica ha de ser fàcilment manipulable per a ser més accessible a tota aquella persona que desitgi fer ús de la bancada.
- **REQ.9.** Per a comprovar el correcte funcionament de la bancada ha de realitzar-se una prova estàtica amb un motor comercial.

	Verificació
REQ_1	Revisió del disseny
REQ_2	Test de transport
REQ_3	Càlcul i revisió del disseny
REQ_4	Test d'ignició i examen visual
REQ_5	Test d'ignició i examen visual
REQ_6	Test d'adquisició de dades
REQ_7	Test d'adquisició de dades
REQ_8	Posada en marxa per una tercera persona
REQ_9	Test d'ignició amb adquisició de dades

Taula 1.1: Taula de verificació de requisits tècnics.

1.4 JUSTIFICACIÓ I UTILITAT

El projecte pretén posar en funcionament una bancada de prova de motors de coet parcialment realitzada per el professor Manel Soria Guerrero, de manera que aquesta es trobi completament operativa i a disposició de la ESEIAAT.

Tenint en compte que es tracta d'una escola on hi ha un gran interès per l'àmbit aeroespacial, això permetrà, tant a professorat com alumnat, tenir la possibilitat de realitzar proves estàtiques de motors comercials o prototips dins de la mateixa universitat i en un entorn controlat. A més, agilitzarà el procés de provar un motor de la persona que ho desitgi perquè no haurà de dedicar temps a la construcció d'un banc de proves al tenir-ne un disponible.

Com que en un ambient universitari és habitual treballar amb coets de petita escala, la bancada estarà pensada per a adaptar-se a motors d'aquesta mida. En quant a la obtenció de dades, permetrà obtenir informació sobre l'impuls dels motors que es provin a partir de les lectures de força d'una cèl·lula de carrega. Per contra, no es contempla que la bancada estigui adaptada per a obtenir dades de pressió i temperatura a l'interior de la cambra de combustió. Adaptar un motor per a poder acoblar un transductor de pressions augmenta de forma considerable la complexitat del disseny.

La seguretat durant les proves d'ignició és el principal element crític del projecte i requereix la màxima atenció possible. El pitjor cas que es pot donar és que el motor arribi a explotar. Quan això succeeix és important que la metralla i la tovera sobretot no surtin disparades i, per tant, s'han de disposar barres de protecció en totes les direccions. A més, s'ha de procurar que la bancada no es desplaci a causa de l'impuls del motor i, en aquest cas, l'escola disposa d'una zona adaptada amb forats a terra que subjecten l'estructura del banc.

Fins al moment, la ESEIAAT no ha disposat de cap bancada que permeti provar motors de coet a dins de l'escola. El professor Manel Soria Guerrero va iniciar un projecte per a construir-ne una amb aquesta finalitat i actualment es troba a mig fer. Aquest projecte pretén acabar-la implementant les millores que siguin necessàries per a fer-la més accessible a tothom que ho necessiti i en les millors condicions de seguretat possibles.

Capítol 2

ESTAT DE L'ART I ALTERNATIVES

Índex

2.1	ESTAT DE L'ART	10
2.1.1	Sensometria	10
2.1.2	Adquisició de dades	11
2.2	SELECCIÓ D'ALTERNATIVES	11

2.1 ESTAT DE L'ART

La primera prova estàtica d'un motor de coet data de l'abril de 1966 quan la NASA va posar a prova la segona etapa del coet Saturn V. A partir d'aquell moment, l'avanç de la tecnologia ha permès que el fet de testejar un motor no quedi restringit simplement a empreses amb un extraordinari nivell econòmic. El principal objectiu d'aquestes proves és convertir tot el coneixement teòric que s'ha utilitzat en el disseny d'un motor a dades tangibles, és a dir, obtenir el gràfic de l'impuls en funció del temps, entre d'altres.

A part d'un bon disseny estructural que sigui capaç de suportar tots els esforços generats durant la prova, l'electrònica del banc permetrà obtenir totes aquelles dades del motor que siguin del nostre interès. Aquesta es divideix principalment en dos parts: el conjunt de sensors i el sistema d'adquisició de dades.

2.1.1 Sensometria

En bancades dissenyades per a coets de petita escala, els sensors més utilitzats són les cèl·lules de càrrega, transductors de pressió i termoparells. Aquest permeten obtenir empenta, pressió a l'interior de la cambra de combustió i temperatures a diferents punts del motor, respectivament. Entre aquests, la cèl·lula de càrrega és el més important i imprescindible i els altres dos són

opcionals. Cal remarcar que l'ús de transductors de pressió augmenta la complexitat de la bancada i el motor pel disseny de la presa de pressió a l'interior de la cambra.

2.1.2 Adquisició de dades

L'adquisició de dades bàsicament presenta dues solucions. En primer lloc, es pot utilitzar una plataforma de creació d'electrònica de codi obert com pot ser Arduino amb els corresponents components per a tractar la senyal de la cèl·lula de càrrega. Per altra banda, existeix la opció d'utilitzar un mòdul d'adquisició de dades (DAQ) el qual es complementa amb un amplificador de senyal. Aquest últim permet amplificar el valor de la senyal analògica que surt de la cèl·lula per a que pugui ser llegida i convertida gràcies al DAQ de forma correcta.

El principal avantatge que presenta utilitzar plataformes de codi obert és la seva gran versatilitat a nivell de microcontroladors i perifèrics que es complementa amb un baix cost d'adquisició. El seu desavantatge és que les prestacions que presenta a nivell de lectura de dades són baixes. En el cas d'utilitzar el DAQ, el seu cost és molt més elevat però presenta millors prestacions.

2.2 SELECCIÓ D'ALTERNATIVES

Tenint en compte que el projecte parteix d'una bancada amb l'estructura dissenyada i construïda, cal escollir una electrònica que s'ajusti als requeriments proposats.

Cal destacar que la sensometria de la bancada no pretén ser modificada, per tant, estarà formada per una cèl·lula de càrrega. Reduir la complexitat de la sensometria permet que la bancada s'ajusti a un major número de motors de coet.

El principal factor a tenir en compte a l'hora de decidir entre una de les alternatives és que la bancada es troba en un ambient estudiantil i, per tant, la complexitat dels motors de coet que es puguin testejar serà moderada. A més, molts d'aquests motors seran prototips creats per professors i estudiants els quals es provaran amb l'objectiu de comprovar el seu correcte funcionament i no d'obtenir grans dades de sensometria. És per això que l'ús de la plataforma de codi obert Arduino és la millor opció per a aquest projecte. Aquesta permet obtenir una electrònica senzilla d'utilitzar, amb una precisió a les lectures completament acceptable i versàtil si en un futur s'han de dur a terme modificacions o millores. Escollint aquesta alternativa també s'afavoreix la reducció de costos.

Capítol 3

DESENVOLUPAMENT DE LA SOLUCIÓ PROPOSADA

Índex

3.1 ESTRUCTURA	13
3.1.1 Sistema de protecció contra els gasos d'escapament	13
3.1.2 Proteccions contra fallada de motor	15
3.2 ELECTRÒNICA	20
3.2.1 Característiques de la cèl · lula de càrrega LCS-D1	20
3.2.2 Components electrònics	21
3.2.3 Esquema de connexions	25
3.2.4 Codi Arduino	27
3.2.5 Lectura del port sèrie (PuTTY)	30
3.2.6 Calibratge de la cèl · lula de càrrega LCS-D1	30
3.2.7 Especificacions de la electrònica amb la cèl · lula de càrrega LCS-D1	34
3.3 PROVA ESTÀTICA N°1	34
3.3.1 Elecció del motor	34
3.3.2 Resultats	36
3.3.3 Conclusions	37
3.4 MODIFICACIONS	38
3.4.1 Característiques de la cèl · lula de càrrega FX1901	38
3.4.2 Esquema de connexions	39
3.4.3 Estructura	39
3.4.4 Calibratge de la cèl · lula de càrrega FX1901	40
3.4.5 Especificacions de la electrònica amb la cèl · lula de càrrega FX1901	43
3.5 PROVA ESTÀTICA N°2	44
3.5.1 Elecció del motor	44
3.5.2 Resultats	44
3.5.3 Conclusions	45

En aquest apartat es detallen tots els processos i justificacions seguits en el desenvolupament del projecte. A nivell de l'estructura, es defineixen els materials utilitzats per a la protecció de la bancada contra els gasos d'escapament i es realitza un estudi de les proteccions de seguretat que aquesta contempla. Quant a l'electrònica, es determinen el conjunt de components que la formen i els processos de connexionat i programació seguits per a fer-la funcional. També s'adjunten els resultats de les proves estàtiques realitzades amb les corresponents conclusions i modificacions.

3.1 ESTRUCTURA

Tal i com s'especifica anteriorment, l'estructura de la bancada ja es troba construïda quan es decideix iniciar aquest projecte. Per tant, l'objectiu principal consisteix en implementar un sistema per evitar malmetre-la durant les ignicions a causa dels gasos d'escapament. També s'estudien les proteccions en el cas de que un motor exploti per a quantificar la seva resistència.

3.1.1 Sistema de protecció contra els gasos d'escapament

Un dels principals factors que pot debilitar l'estructura durant les ignicions són els gasos d'escapament quan aquests entren directament en contacte amb l'estructura. Els gasos, a part de trobar-se a temperatures elevades superiors als 400°C, també estan formats per elements químics que poden atacar l'estructura. Es poden generar capes d'òxid que amb el temps ocasionen punts de fallada estructural.

Per aconseguir un aïllament òptim de la estructura es requereix un teixit ignífug capaç de suportar altes temperatures durant petits instants de temps (els motors de coet no acostumen a cremar més de 5 segons) a l'hora que sigui resistent a possibles reaccions químiques. Amb aquests condicionants, la millor solució la trobem a l'empresa Texfire, a la qual se li ha d'agrair la col·laboració en aquest projecte, amb els seu teixit multicapa WELD SX.

Teixit ignífug multicapa WELD SX

El teixit multicapa WELD SX està dissenyat per a oferir el màxim nivell de protecció durant qualsevol treball a altes temperatures, sense importar la distància a la que es col·loca el teixit ni la superfície a la qual incideix la flama (ambdós cares del teixit són ignífugues). La seva composició està formada per una base de fibra de vidre e-glass recoberta amb silicona negra per una de les seves cares i amb pelfa carbonitzada per l'altra (figura 3.1). El teixit WELD SX suporta temperatures de 450°C en treball continu i pot arribar a suportar fins a 1300°C en puntes de treball. Les principals característiques es detallen a la taula 3.1.

Composició	62%GL 28%PAN 10%SIL
Pes	730 g/m2
Temperatura treball continuo	450 °C
Temperatura màxima	1300 °C

Taula 3.1: Propietats del teixit ignífug multicapa WELD SX [1].

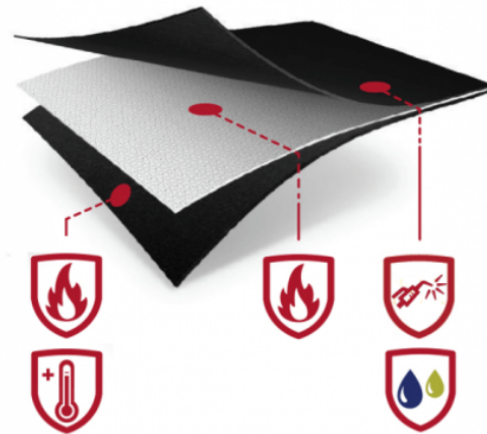


Figura 3.1: Capes del material ignífug *WELD SX*.

Una vegada tallats els retalls amb les dimensions que s'adjunten a l'annex E i enganxats amb cinta de doble cara a l'estructura, s'ha obtingut el següent resultat que es mostra a la figura 3.2. El teixit recobreix les parts interiors i superiors dels perfils d'acer al ser les parts de l'estructura més exposades als gasos de combustió dels motors.



Figura 3.2: Material ignífug col·locat a l'estructura de la bancada.

3.1.2 Proteccions contra fallada de motor

El cas més crític durant una ignició es dona quan el motor de coet falla i arriba a explotar. En aquesta situació la metralla surt disparada en totes direccions conjuntament amb la tovera del motor que acostuma a ser la part de majors dimensions. Tenint en compte que la bancada està dissenyada per a fer les proves en una zona adaptada dins de les instal·lacions de la universitat, les proteccions han de ser efectives per a protegir l'entorn.

La bancada presenta dues proteccions en forma de reixa. Una recobreix el motor i va subjectada al banc i l'altre es col·loca a la part posterior del motor tal i com es mostra a la figura 3.3. La segona protecció és la que rebrà l'impacte de la tovera si es dona el cas que aquesta surt projectada, per tant, és la que requereix un estudi de resistència.



Figura 3.3: Proteccions de seguretat de la bancada.

En primer lloc, cal detectar quins són els principals motius de fallada d'un motor i quin és el més crític. Cal concretar que aquests es donaran per un excés de pressió a la cambra de combustió. Es poder donar dos casos:

- Fallada per esquinçament de la camisa de la cambra de combustió.
- Fallada per aixafament de la cambra de combustió en les zones de subjecció de la tovera amb visos.

Una vegada coneguts ambdós casos, es calculen les pressions a les quals succeïxen. Per a fer l'estudi es suposa una cambra de combustió cilíndrica d'alumini 6060-T6 amb un diàmetre exterior de 25 mm i un espessor de 1 mm tal i com es mostra a la figura 3.4. El diàmetre exterior escollit es deu

a que la bancada presenta una cèl·lula de càrrega de 50 N i, quan es tracta de coets comercials, es treballa amb aquest diàmetre estàndard per a empenes similars a aquest valor.

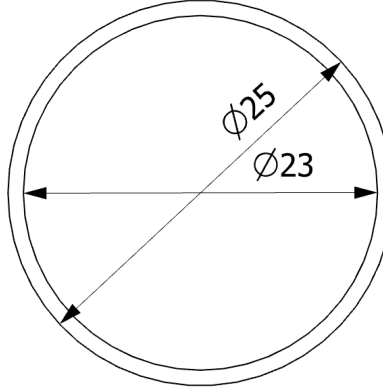


Figura 3.4: Dimensions de la cambra de combustió.

En el primer cas s'aplica la regla de Barlow la qual permet obtenir la pressió a la qual cedeixen les parets d'un tub [8]. Aquesta és la següent:

$$P = \frac{2F_{uv}e}{D_{ext}} \quad (3.1)$$

En aquest cas la F_{uv} de l'alumini 6060-T6 és 220 MPa [9] i, per tant, s'obté:

$$P_1 = \frac{2 \cdot 220 \text{ MPa} \cdot 1 \text{ mm}}{25 \text{ mm}} = \mathbf{17.6 \text{ MPa}} \quad (3.2)$$

A continuació es calcula la pressió per al segon cas. Es suposa la utilització de 4 visos M3. L'expressió que permet calcular la resistència a l'aixafament [10] de la cambra de combustió és la següent:

$$F_b = \frac{2.5 \alpha F_{uv} d e}{1.25} \quad \text{on} \quad \alpha = \frac{e_1}{3d} \quad (3.3)$$

En aquest cas es suposa que el forat del vis es troba a 5 mm de l'extrem de la cambra de combustió i obtenim:

$$\alpha = \frac{5 \text{ mm}}{3 \cdot 3 \text{ mm}} = 0.556 \quad (3.4)$$

$$F_b = \frac{2.5 \cdot 0.556 \cdot 220 \text{ MPa} \cdot 3 \text{ mm} \cdot 1 \text{ mm}}{1.25} = 733.9 \text{ N} \quad (3.5)$$

Com que hi ha 4 visos:

$$F_{bTOTAL} = 4 \cdot 733.9 = 2936 \text{ N} \quad (3.6)$$

Per a poder comparar-ho amb l'altre cas és necessari passar-ho a unitats de pressió:

$$P_2 = \frac{F_{bTOTAL}}{A_{int}} = \frac{2936 N}{\frac{\pi}{4} \cdot (24 mm)^2} = \mathbf{6.45 MPa} \quad (3.7)$$

S'observa com la pressió en el segon cas ($P_2 = 6.45 MPa$) és bastant més baixa que en el primer ($P_1 = 17.6 MPa$), per tant, en el cas crític fallen les subjeccions de la tovera amb la cambra de combustió i no pas el tub que forma la cambra de combustió.

Estudi de les proteccions per fallada de les subjeccions de la tovera

Una vegada es coneix la pressió crítica de la cambra, es pot realitzar un estudi d'impacte mitjançant ANSYS. Aplicant el principi fonamental de la dinàmica es pot obtenir la velocitat de l'objecte just en l'instant anterior a que es produeixi el xoc.

Per a l'estudi es tracta el moviment de la tovera com un moviment rectilini uniformement accelerat (MRUA) i es menysprea la trajectòria parabòlica que pugui presentar. Es suposa que la protecció es troba a 50 cm de la posició inicial de la tovera la qual té un pes de 80 grams.

El pas previ per a aplicar les equacions que defineixen el MRUA és el càlcul de l'acceleració de la tovera. Per a això s'utilitza la força calculada anteriorment:

$$F = m \cdot a \quad (3.8)$$

$$a = \frac{F}{m} = \frac{2936 N}{0.08 kg} = 3.67 \cdot 10^4 m/s^2 \quad (3.9)$$

Si es coneix l'acceleració ja es poden aplicar les equacions d'un MRUA:

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (3.10)$$

$$v = v_0 + a t \quad (3.11)$$

on, en aquest cas, $v_0 = 0 m/s$ i $x_0 = 0 m$ i obtenim:

$$t = \sqrt{\frac{2x}{a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0.5 m}{3.67 \cdot 10^4 m/s^2}} = 5.22 \cdot 10^{-3} s \quad (3.12)$$

$$v = a t = 3.67 \cdot 10^4 m/s^2 \cdot 5.22 \cdot 10^{-3} s = 192 m/s \quad (3.13)$$

Per tant, a la velocitat que impacte la tovera contra la protecció si aquesta està situada a una distància de 50 cm respecte la posició inicial de la tovera és de 192 m/s.

Simulació de l'impacte amb ANSYS

El programari de simulacions ANSYS permet fer simulacions d'impactes entre objectes a partir de la seva extensió *Explicit Dynamics*. És aquesta mateixa la que s'ha fet servir per a obtenir els resultats del xoc entre la tovera d'un motor de coet i les proteccions. L'objectiu és comprovar si

s'arriba a la ruptura de les proteccions durant l'impacte.

Per a la simulació és necessari en primer lloc generar un disseny assistit per ordinador (CAD) de les peces que seran objecte d'estudi. Per altra banda, s'han de definir els materials d'aquestes. En aquest cas s'ha utilitzat un acer de qualitat S235 en ambdós casos. L'acer S235 s'utilitza comunament tant en planxes laminades en calent, com és el cas de les proteccions, com en calibrats de carboni dels quals es pot obtenir la tovera a partir d'un procés de mecanitzat.

Les propietats del material necessàries per a dur a terme la simulació amb *Explicit Dynamics* s'especifiquen a la taula 3.2.

ACER S235	
Densitat	7850 kg/m ³
Mòdul d'elasticitat	210 GPa
Coefficient de Poisson	0,3

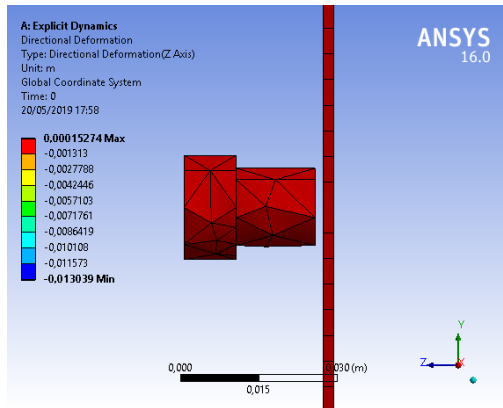
Taula 3.2: Propietats de l'acer S235 [2].

Definits els dissenys 3D i els materials, el següent pas és a dur a terme la configuració de la simulació. El principals aspectes es destaquen a continuació:

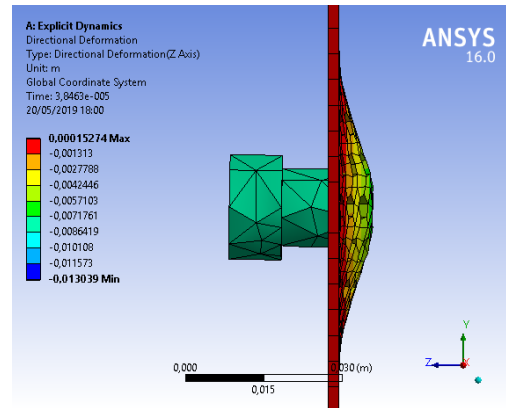
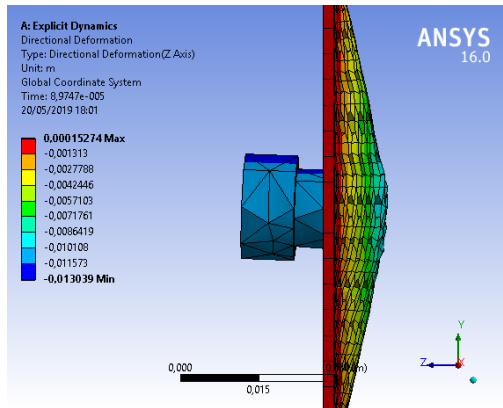
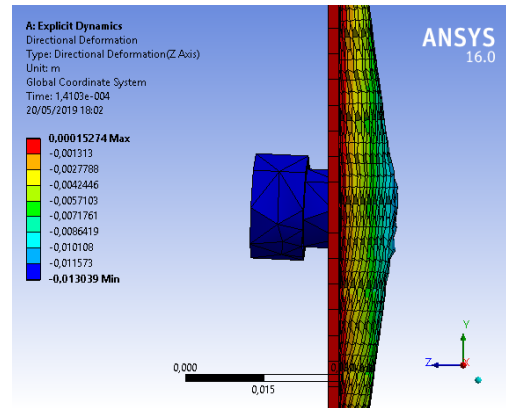
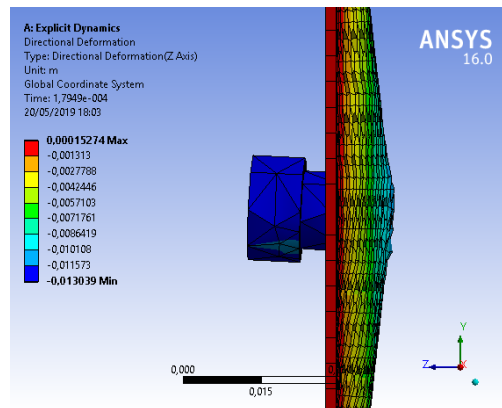
- S'ha definit la mida dels elements de la malla en 1 cm.
- S'ha restringit el moviment dels 4 laterals de la planxa perforada (protecció). Les úniques parts que permeten el moviment són la cara que rep l'impacte i la posterior.
- S'ha definit la tovera com un sòlid rígid i s'ha menyspreat la deformació que pugui patir. La deformació interessant de cara l'estudi és la de la protecció.
- S'ha establert una condició inicial de 192 m/s a la tovera en l'eix Z.
- S'ha configurat la simulació per a calcular la deformació direccional en l'eix Z.

Els resultats obtinguts es presenten a la figures que s'adjunten a continuació. A la figura 3.5, es mostra la deformació de diversos instants de temps des de l'instant inicial fins a l'instant de màxima deformació. Per altra banda, a la figura 3.6 es mostra una captura general de l'instant on la protecció presenta la màxima deformació.

En els resultats s'observa clarament com no es produeix la ruptura de la protecció, per tant es demostra la seva validesa. Cal destacar, però, que l'estudi s'ha realitzat per a un motor d'una empenta màxima de 50 N. En el cas que es vulgues estudiar el comportament d'un motor que es trobi per sobre d'aquest valor s'hauria de repetir el procés.



(a) Instant inicial.

(b) Instant $t = 3.85 \cdot 10^{-5}$ s.(c) Instant $t = 8.97 \cdot 10^{-5}$ s.(d) Instant $t = 1.41 \cdot 10^{-4}$ s.

(e) Instant deformació màxima.

Figura 3.5: Seqüència de la simulació amb ANSYS de l'impacte de la tovera contra les proteccions.

3.1. ESTRUCTURA

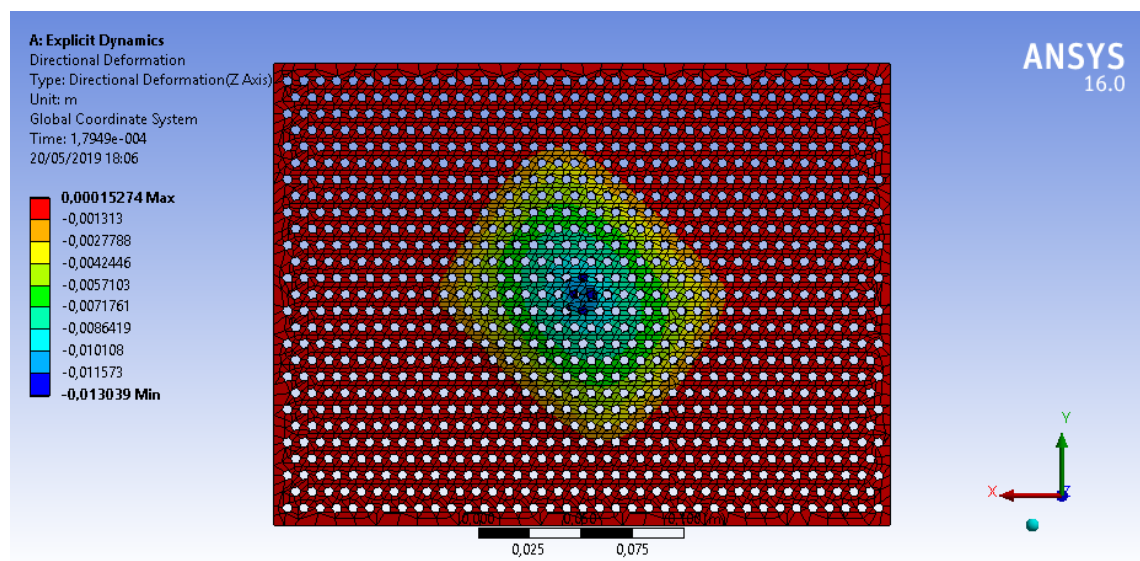


Figura 3.6: Instant de deformació màxima de la protecció durant la simulació.

3.2 ELECTRÒNICA

L'electrònica, basada en una placa d'Arduino, ha d'estar dissenyada per a controlar els sensors de la bancada la qual disposa únicament d'una cèl·lula de càrrega. L'objectiu és obtenir mesures d'empenta dels motors que es testin per a poder caracteritzar-los.

3.2.1 Característiques de la cèl·lula de càrrega LCS-D1

Conèixer les característiques que presenten els sensors és de gran importància per a un disseny òptim de l'electrònica. A la taula 3.3 s'especifiquen les principals característiques de la cèl·lula de càrrega que es mostra a la figura 3.7.

Marca	SMOWO
Model	LCS-D1
Material	Aliatge d'alumini
Càrrega nominal	5 kg
Precisió global	0.02 (linealitat + histèresis + repetibilitat)
Sensibilitat	2 mV/V
Excitació	5-12 V DC
Sobrecàrrega de seguretat	150 % C.N.
Sobrecàrrega límit	200 % C.N.

Taula 3.3: Característiques de la cèl·lula de càrrega LCS-D1 [3].

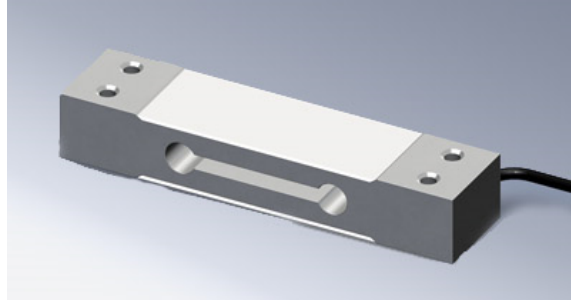


Figura 3.7: Cèl·lula de càrrega model LCS-D1.

3.2.2 Components electrònics

Les principals funcions que ha de complir l'electrònica són:

- Amplificar la senyal analògica de sortida de la cèl·lula de càrrega que és de l'ordre dels mil·livolts (mV). Es requereix un amplificador diferencial.
- Convertir la senyal analògica amplificada en una senyal digital per a poder ser llegida i manipulada per un microordinador. Es requereix un convertidor de senyal analògica a digital (ADC).
- Transmetre la informació a un ordinador per a poder ser estudiada posteriorment. Es requereix un microordinador basat, en aquest cas, en un Arduino MEGA 2560.

A continuació es descriuen cada un dels components citats amb les seves principals característiques.

Arduino MEGA 2560

L'Arduino MEGA 2560 és un microcontrolador basat en el ATmega2560. Les principals característiques es mostren a la taula 3.4 i els principals pins de connexió a la figura 3.8.

Microcontrolador	ATmega2560
Tensió de funcionament	5 V
Tensió d'alimentació	7-12 V
Pins digitals I/O	54 (15 dels quals proporcionen una sortida PWM)
Pins entrada analògica	16
Memòria flash	256 KB

Taula 3.4: Característiques de l'Arduino MEGA 2560 [4].

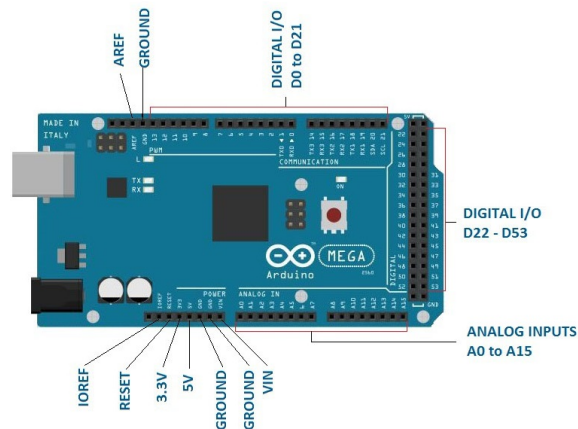


Figura 3.8: Principals pins de connexió de l'Arduino MEGA 2560.

El gran avantatge que presenta aquesta placa d'Arduino respecte d'altres és el gran nombre d'entrades i sortides que presenta, sobretot les digitals.

Amplificador diferencial

La funció principal de l'amplificador diferencial, tal i com descriu el seu propi nom, és amplificar la senyal analògica de la cèl·lula de càrrega. Augmentant el valor de la senyal aconseguim una millor resolució a l'hora de convertir-la en una senyal digital.

La sensibilitat de la cèl·lula de càrrega és 2 mV/V . Si utilitzem els 5 V que proporciona l'Arduino per excitar-la, s'obtenen 10 mV de senyal quan a aquesta se li apliquen 5 kg de força, aproximadament. Es pot alimentar la cèl·lula a un major voltatge (fins a 12 V), però d'aquesta manera evitem haver de fer servir bateries externes o haver de passar un cable d'alimentació fins on es trobi situada la bancada.

10 mV de senyal de sortida és un valor massa petit, per aquest motiu interessa amplificar-lo. A partir de la placa amb un amplificador diferencial que es mostra a la figura 3.9 es pot amplificar aquest valor fins a un valor 43 vegades major [11]. És a dir, s'obté una senyal de 430 mV aproximadament.

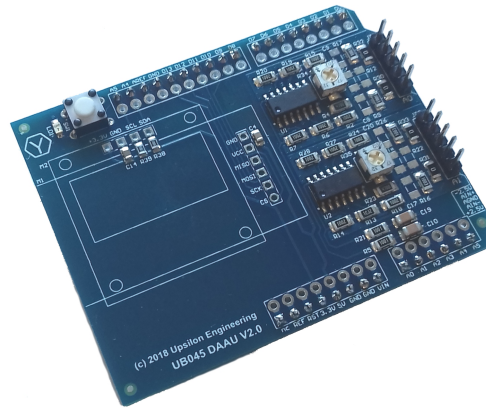


Figura 3.9: Amplificador diferencial.

La placa està formada per dos amplificadors diferencials connectats als pins A0 i A1 de l'Arduino respectivament (seguint l'esquema que es mostra a la figura 3.11), encara que en aquesta aplicació només se'n fa servir un d'ells. Cada amplificador disposa d'un potenciòmetre per a regular el guany. La placa s'acobla directament a l'Arduino i les entrades que pot utilitzar l'usuari es mostren a la figura 3.10.

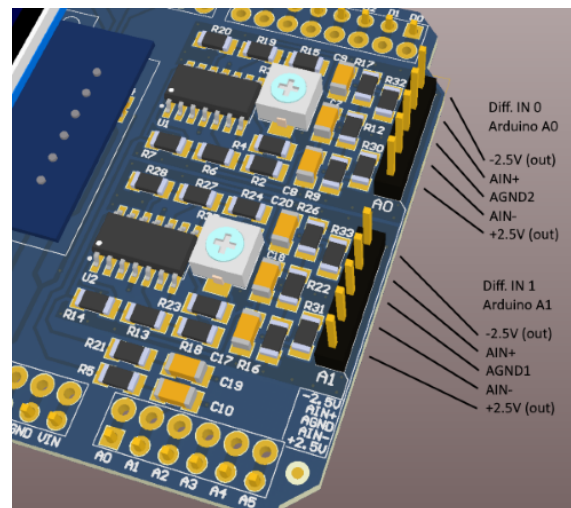


Figura 3.10: Entrades amplificador diferencial.

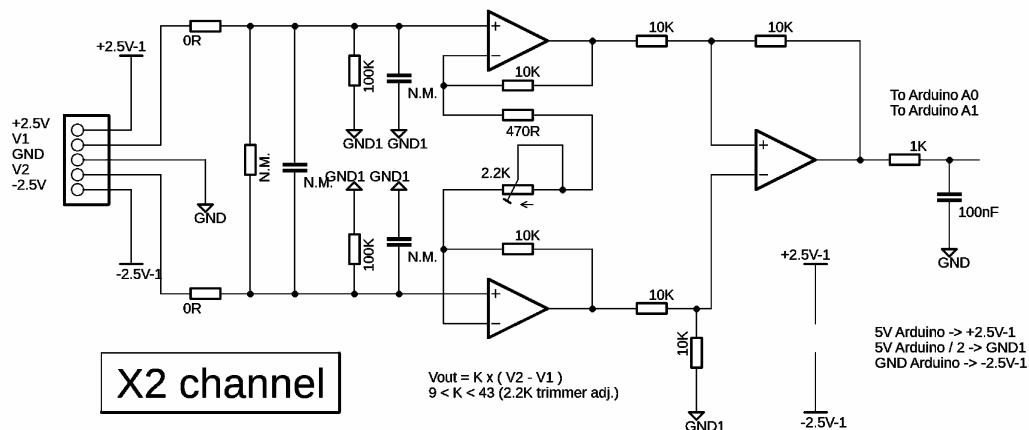


Figura 3.11: Esquema electrònic de l'amplificador diferencial.

Convertidor analògic-digital AD7606

El AD7606 és un mòdul convertidor analògic-digital d'alta precisió dissenyat amb un microcontrol·lador de 8 entrades analògiques. Les principals especificacions tècniques es troben a la taula 3.5 i l'esquema electrònic de la figura 3.12.

Tensió d'alimentació	3.3 o 5 Vcc
Protocol	SPI
Número de entrades analògiques	8
Resolució ADC	16 bit
Taxa de mostratge	200 ksps

Taula 3.5: Especificacions tècniques del AD7606 [5].

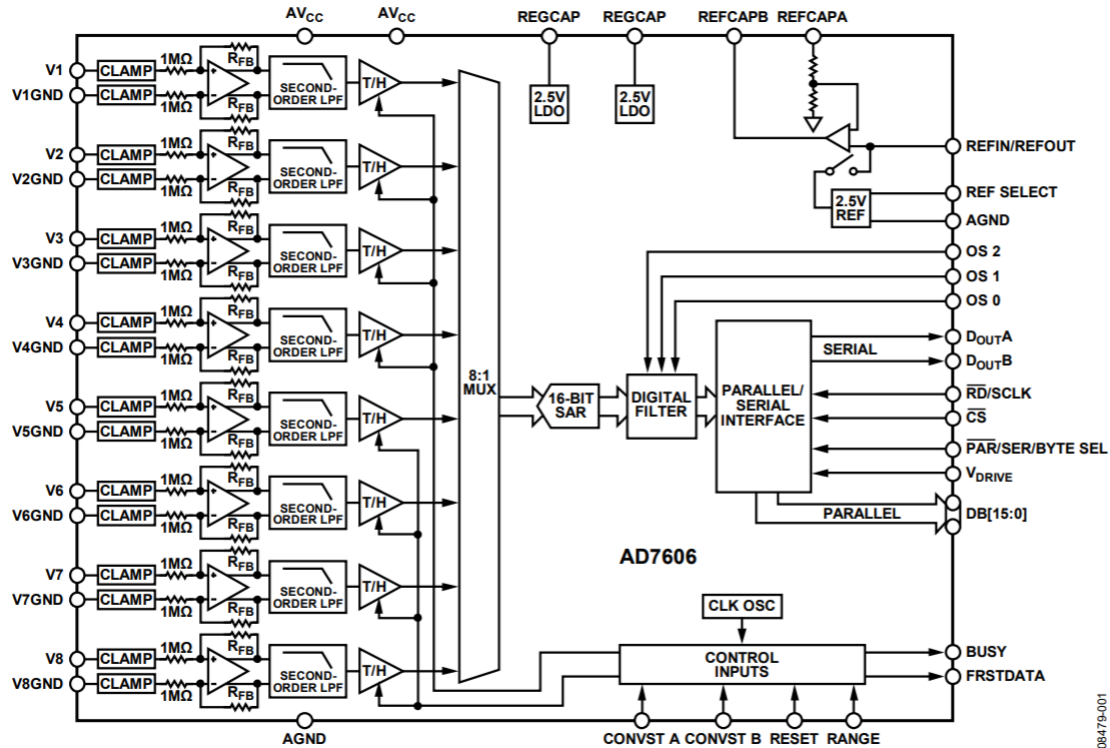


Figura 3.12: Esquema electrònic del AD7606.

El principal avantatge que presenta el mòdul ADC AD7606, a part de la seva elevada taxa de mostratge, és la seva resolució de 16 bits. La placa d'Arduino presenta el seu propi convertidor analògic-digital però, en aquest cas, és de tan sols 10 bits. Tenint en compte que ambdós convertidors tenen una referència analògica de 5V, amb 10 bits es poden diferenciar lectures de 4.9 mV (1024 combinacions) i amb 16 bits es pot arribar fins a 0.076 mV (65536 combinacions).

3.2.3 Esquema de connexions

A continuació s'especifiquen els esquemes de connexió entre els diferents components de l'electrònica.

Arduino MEGA i amplificador diferencial

L'amplificador diferencial es un circuit imprès de l'estil *shield*, és a dir, s'acobla directament als pins de l'Arduino MEGA (figura 3.13).

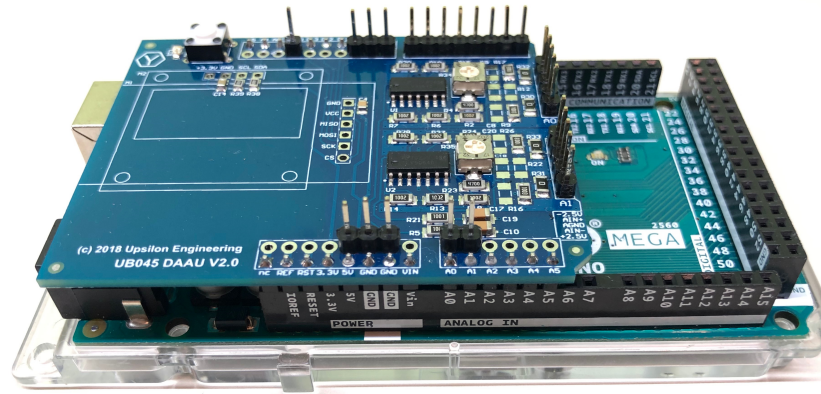


Figura 3.13: Connexió estil *shield* entre l'Arudino MEGA i l'amplificador diferencial.

Arduino MEGA i ADC AD7606

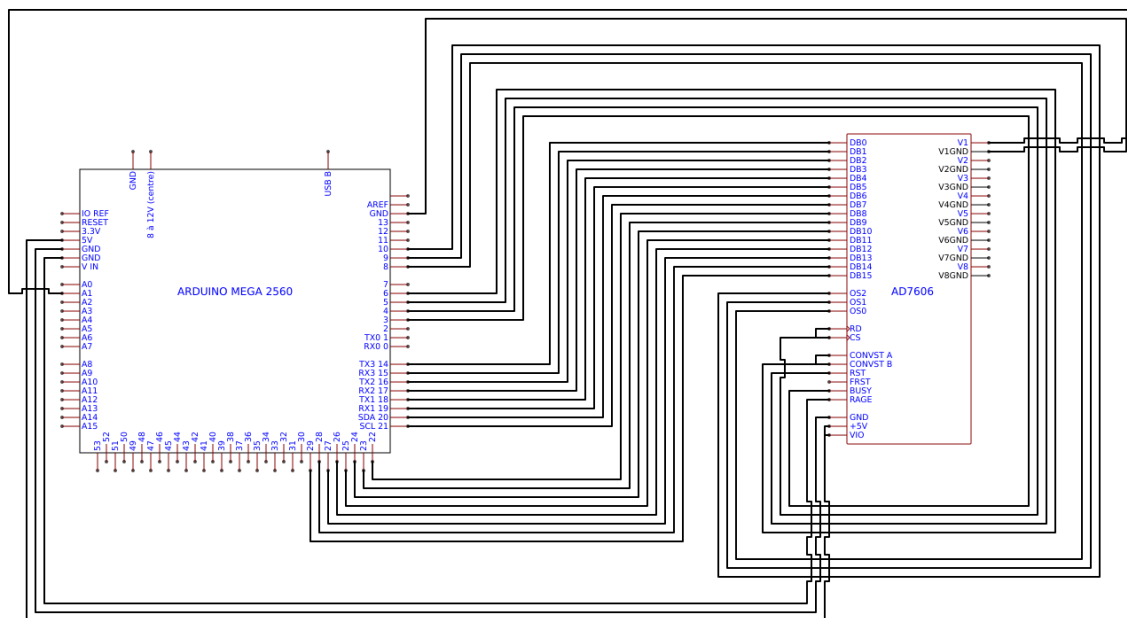


Figura 3.14: Esquema de connexions entre l'Arduino MEGA i l'ADC.

Cèl·lula de càrrega, Arduino MEGA i amplificador diferencial

La cèl·lula de càrrega presenta un pont de Wheatstone amb 4 cables (figura 3.15) els quals es connecten segons s'especifica a la taula 3.6.

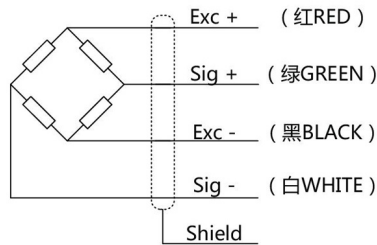


Figura 3.15: Esquema de cablejat de la cèl·lula de càrrega LCS-D1.

Arduino MEGA	
Vermell	5V
Negre	GND
Amplificador Diferencial	
Verd	AIN+
Blanc	AIN-

Taula 3.6: Connexió de la cèl·lula de càrrega LCS-D1 a l'electrònica.

3.2.4 Codi Arduino

En aquest apartat es comenten els aspectes més destacats del codi de l'electrònica programat amb l'entorn de desenvolupament integrat d'Arduino. La resta del codi s'adjunta a l'annex A d'aquest document.

El primer aspecte a destacar és l'ús de la llibreria *EnableInterrupt*. Aquesta permet generar interrupcions en un pin concret de la placa de l'Arduino i poder realitzar una tasca concreta. En aquest cas, s'utilitza per a generar interrupcions en el pin *BUSY* de l'ADC i cridar a la funció *IRS_* (línia 12 del codi mostrat a continuació) que és l'encarregada de llegir la senyal analògica i convertir-la a digital. El mode *FALLING* indica que la senyal del pin *BUSY* pren valors de 0 a 1.

Ús de la llibreria *EnableInterrupt*.

```
1 void loop() {  
2  
3   // S'atura la interrupcio  
4   disableInterrupt(BUSY);  
5  
6   // S'inicialitza la conversio i es produeix la interrupcio  
7   digitalWrite(CONVST, LOW);  
8   delayMicroseconds(10);  
9   digitalWrite(CONVST, HIGH);  
10  enableInterrupt(BUSY, ISR_, FALLING);  
11 }  
12  
13 // Es defineix la funcio a realitzar durant la interrupcio del pin BUSY  
14 void ISR_ () {  
15   delayMicroseconds(1);  
16   digitalWrite(RD_, LOW); // RD_ (negat) ha d'estar actiu per a llegir  
17   delayMicroseconds(1);  
18   lecturaDBpins(); // Es crida la funcio que realitza la conversio  
19   digitalWrite(RD_, HIGH);  
20 }
```

Com es pot observar en el codi anterior, dins de la funció *ISR_* es crida a la funció *lecturaDBpins* (línia 18). Aquesta és l'encarregada de llegir els 16 pins amb sortida digital que presenta l'ADC, els quals poden valer 0 o 1, i obtenir el valor final de la conversió. Aquest procés és realitza a partir de utilitzar condicionals *if* i el vector de 16 enters *rawData* tal i com es mostra a continuació. L'objectiu es obtenir tots els bits que valen 1 i finalment sumar-los per a determinar el valor de la conversió analògic-digital. Una vegada obtinguda la conversió, també és l'encarregada de imprimir el temps i el valor d'aquesta pel port sèrie. Les dades generades, una vegada guardades en un arxiu *.txt*, permeten obtenir la gràfica d'empenta.

Lectura dels pins digitals de l'ADC.

```
1 void lecturaDBpins() {
2   rawData[0] = digitalRead(DB15);
3
4   if (rawData[0] > 0) {rawData[0] = 32768;}
5   rawData[1] = digitalRead(DB14);
6
7   if (rawData[1] > 0) {rawData[1] = 16384;}
8   rawData[2] = digitalRead(DB13);
9
10  if (rawData[2] > 0) {rawData[2] = 8192;}
11  rawData[3] = digitalRead(DB12);
12
13  if (rawData[3] > 0) {rawData[3] = 4096;}
14  rawData[4] = digitalRead(DB11);
15
16  if (rawData[4] > 0) {rawData[4] = 2048;}
17  rawData[5] = digitalRead(DB10);
18
19  if (rawData[5] > 0) {rawData[5] = 1024;}
20  rawData[6] = digitalRead(DB9);
21
22  if (rawData[6] > 0) {rawData[6] = 512;}
23  rawData[7] = digitalRead(DB8);
24
25  if (rawData[7] > 0) {rawData[7] = 256;}
26  rawData[8] = digitalRead(DB7);
27
28  if (rawData[8] > 0) {rawData[8] = 128;}
29  rawData[9] = digitalRead(DB6);
30
31  if (rawData[9] > 0) {rawData[9] = 64;}
32  rawData[10] = digitalRead(DB5);
33
34  if (rawData[10] > 0) {rawData[10] = 32;}
35  rawData[11] = digitalRead(DB4);
36
37  if (rawData[11] > 0) {rawData[11] = 16;}
38  rawData[12] = digitalRead(DB3);
39
40  if (rawData[12] > 0) {rawData[12] = 8;}
41  rawData[13] = digitalRead(DB2);
42
43  if (rawData[13] > 0) {rawData[13] = 4;}
44  rawData[14] = digitalRead(DB1);
45
46  if (rawData[14] > 0) {rawData[14] = 2;}
47  rawData[15] = digitalRead(DB0);
48
49  if (rawData[15] > 0) {rawData[15] = 1;}
50 }
```

3.2.5 Lectura del port sèrie (PuTTY)

Un desavantatge que presenta la utilització del l'entorn de desenvolupament d'Arduino és que no permet generar un fitxer de text sense format (*.txt*) a partir de les lectures transmeses pel port sèrie. Per a suplir aquesta mancança existeixen dos possibilitats:

- Connectar un mòdul de memòria SD a la placa d'Arduino i guardar les dades generades directament en un fitxer *.txt* dins d'una targeta.
- Utilitzar un programa extern a Arduino per a llegir el port sèrie i amb la capacitat d'exportar les dades a un fitxer *.txt*.

El primer cas té el gran avantatge que tota l'electrònica queda completament integrada i s'executa directament des d'un mateix programa (Arduino IDE). Per contra, guardar dades a la memòria SD consumeix un temps que no pot ser destinat a obtenir lectures de dels sensors i, per tant, es redueix la taxa de mostratge. Si s'opta per utilitzar un programa extern l'electrònica no ha d'interactuar amb la memòria SD i aquesta només s'encarrega de llegir els sensors.

En el cas de la bancada, quant major sigui la taxa de mostratge, millor resolució obtindrem en les lectures quan aquestes presentin variacions amb petits intervals de temps. Per aquest motiu es preferible utilitzar un programa extern encarregat de llegir el port sèrie. Hi ha una gran varietat de programes que compleixen aquesta funció però s'ha escollit utilitzar el programa PuTTY per la seva simplicitat a l'hora de ser utilitzat.

Per a facilitar el procés de graficar les dades obtingudes a partir del port sèrie, s'ha realitzat un programa amb codi MATLAB el qual s'adjunta a l'annex B.

3.2.6 Calibratge de la cèl·lula de càrrega LCS-D1

Una vegada s'ha definit, acoblat i programat l'electrònica és necessari calibrar-la per a que les lectures d'empenta siguin el més exactes i precises. L'objectiu és obtenir una regressió lineal que relacioni directament les lectures de l'electrònica amb un valor d'empenta concret.

Cal indicar que el procés de calibratge s'ha realitzat amb la cèl·lula de càrrega instal·lada a la bancada per a que així es contemplin tots els ajustos, fregaments, etc. que presenta l'estructura. D'aquesta manera el calibratge s'ajusta el millor possible a les condicions de treball reals.

El sistema de calibratge està format per un cordill el qual passa per una politja i a un dels seus extrems s'hi col·loquen les masses patró. L'altre extrem va unit a la plataforma mòbil de la bancada tal i com es mostra a la figura 3.16. D'aquesta manera s'aconsegueix que els pes aplicat sigui igual a la força a la qual es sotmet la cèl·lula de càrrega. Com es pot observar a la figura, el cordill presenta un angle de 6.4° i, per tant, s'ha d'aplicar la correcció corresponent a les masses aplicades abans d'obtenir la regressió.



Figura 3.16: Sistema de calibratge.

Obtenció de dades

El primer pas a realitzar és definir els patrons de calibratge, és a dir, el conjunt de pesos que s'aplicaran a la cèl·lula per a obtenir unes lectures concretes. En aquest cas s'ha utilitzat 5 masses de 1 kg i una massa de 34 grams que contempla el ganxo i la bossa per a col·locar les diferents masses a l'extrem de la cordill.

A continuació, per a cada una de les masses patró, s'obtenen 6 valors de les lectures retirant i tornant a col·locar la massa cada vegada que se n'obté una. També cal obtenir 6 lectures diferent amb la cèl·lula de càrrega en buit (sense cap massa) per a poder obtenir l'error de 0. Cal indicar que les lectures s'han obtingut directament amb els valors *raw*. Això és degut a que l'amplificador diferencial afegeix un *offset* desconegut al valor amplificat a l'hora que el seu guany no presenta un valor exacte (es regula a través d'un potenciòmetre). Aquest fet dificulta la conversió a voltatge una vegada obtinguda la lectura.

Els valors obtinguts es mostren a la taula 3.7. Els valors sense error de 0 s'obtenen a partir de la resta de cada un dels valors de la mitjana aritmètica menys el valor de la mitjana per a 0 grams, és a dir, 16346.2.

	0 g	34 g	1034 g	2034 g	3034 g	4034 g	5034 g
Lectura 1	16344	16369	16919	17384	17860	18360	18888
Lectura 2	16347	16366	16907	17396	17876	18377	18891
Lectura 3	16346	16366	16906	17387	17879	18357	18876
Lectura 4	16345	16367	16904	17380	17876	18384	18870
Lectura 5	16347	16370	16933	17383	17865	18347	18864
Lectura 6	16348	16368	16921	17389	17879	18402	18868
MITJANA	16346.2	16367.7	16915	17386.5	17872.5	18371.2	18876.2
SENSE ERROR DE 0	0	21.5	568.8	1040.3	1526.3	2025	2530

Taula 3.7: Dades obtingudes per a cada una de les masses patró (LCS-D1).

Recta de calibratge

A partir de les dades sense error de 0 i dels diferents pesos de la taula 3.7 s'obté el gràfic de punts de la figura 3.17. D'aquí s'obté la recta de calibratge de l'electrònica a partir de la següent regressió lineal:

$$Massa (g) = 2 \cdot Lectura - 50.7$$

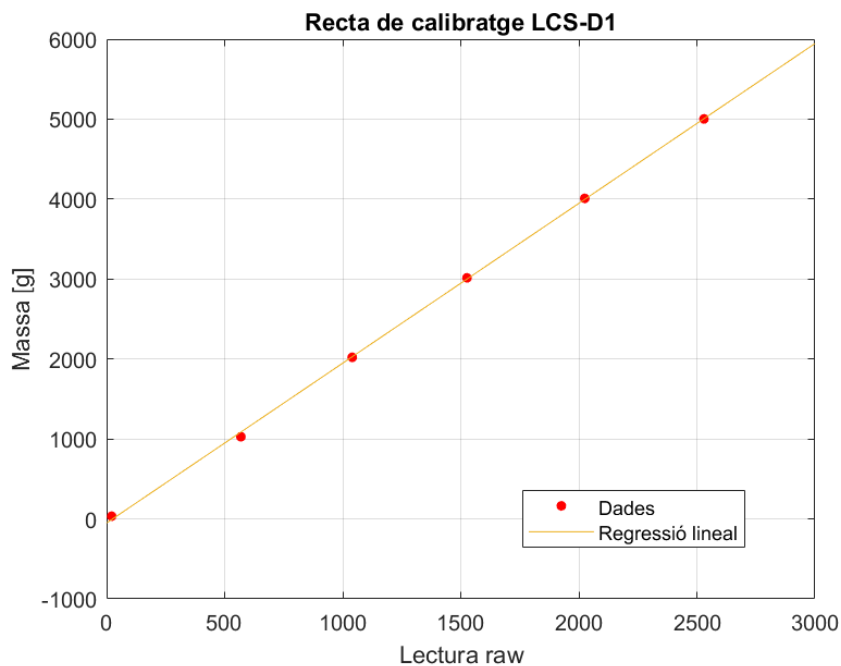


Figura 3.17: Recta de calibratge de la cèl·lula LCS-D1.

De la recta obtinguda, el pendent és la part que realment interessa. La intercepció amb la ordenada variarà lleugerament en funció de l'*offset* que presenti l'electrònica en el moment que s'utilitzi. En aquest cas, després de dur a terme diverses proves amb l'electrònica, s'observa com aquest valor presenta variacions cada vegada que es connecta i desconnecta la cèl·lula de càrrega.

Resolució

Obtinguda la recta de calibratge, podem quantificar la variació mínima d'empenta apreciable per a l'electrònica a partir del pendent que aquesta presenta.

$$Pendent = 2g \approx 0.02 N$$

L'electrònica presenta una resolució de 0.02 newton.

Càlcul d'incerteses

Definida la recta de calibratge, cal calcular l'error que s'està cometent al utilitzar-la [12]. La incertesa d'una mesura obtinguda a partir de la recta depèn dels següents aspectes:

- L'error causat per l'anàlisi estadístic dels patrons de calibratge. Aquest es quantifica a partir de la desviació estàndard de les mostres i l'interval de confiança (95 %).
- L'error que presenten els instruments de mesura utilitzats per a calibrar l'electrònica. En aquest cas es tracta una bàscula per a obtenir els pesos patró i la mateixa cèl·lula de càrrega. Els respectius errors es mostren a la taula 3.8:

BÀSCULA	
Resolució	0,1 grams
ELECTRÒNICA ¹	
Resolució	1 nivell de lectura <i>raw</i>
Linealitat+Histèresi+Repetibilitat	0,02

Taula 3.8: Errors dels instruments.

A continuació, a la taula 3.9, es mostra un resum del càlcul d'incerteses. La taula completa es troba a l'annex C (taula C.1) conjuntament amb el formulari per al càlcul de cada una de les variables.

¹Components electrònics i cèl·lula de càrrega.

Massa ² (g)	Lectura	SD ³	RSS Bas. (%)	RSS Elec. (%)	Error total (%)
0	0	1,47	-	-	-
33,8	21,5	1,63	0,296	7,91	7,92
1027,6	568,8	11,33	0,010	2,56	2,56
2021,3	1040,3	5,61	0,005	2,05	2,05
3015,1	1526,3	8,02	0,003	2,04	2,04
4008,9	2025	20,29	0,002	2,16	2,16
5002,6	2530	11,07	0,002	2,03	2,03

Taula 3.9: Resum càlcul incerteses cèl · lula LCS-D1.

Finalment, l'error que presenta la recta de calibratge és igual a la mitjana aritmètica del conjunts d'errors totals de cada una de les mesures. Per tant, aquest és igual a 3.13 % de la mesura obtinguda.

L'electrònica presenta un error del 3.13 % en les mesures.

3.2.7 Especificacions de la electrònica amb la cèl · lula de càrrega LCS-D1

A la taula 3.10 es presenta un resum amb les principals característiques de l'electrònica amb el model de cèl · lula de càrrega LCS-D1.

Resolució	0.02 N
Taxa de mostratge	940 mostres/s
Pendent recta calibratge	2
Error	3.13 %

Taula 3.10: Especificacions de l'electrònica amb la cèl · lula de càrrega LCS-D1.

3.3 PROVA ESTÀTICA N°1

El correcte funcionament de la bancada depèn, principalment, de dos factors: estructural i electrònic. Ambdós presenten un correcte funcionament per separat però, es pot donar el cas que sorgeixin errors quan es combinen entre ells. Per tant, el millor mètode per a validar-la és posar-la a prova a partir de la realització d'una prova estàtica.

3.3.1 Elecció del motor

La solució més senzilla és utilitzar un motor comercial. Aquest principalment presenta tres avantatges:

- Elimina la complexitat d'haver de dissenyar i construir un motor.

²Corregida amb el cosinus de 6.4°.

³Desviació estàndard.

- Augmenta la fiabilitat de l'encesa assegurant una bona ignició i reduint les possibilitat de que es produeixi una explosió durant la combustió.
- Permet comparar els resultats obtinguts amb resultats validats pel fabricant del model.

Al mercat hi ha una gran oferta de motors de coet amb una gran ventall d'opcions en quan a empenta es refereix. Es poden trobar motors de més de 500 N d'empenta. En aquest cas, però, durant la realització d'aquest projecte hi ha hagut una manca d'existències al mercat i s'ha hagut d'utilitzar una de les poques opcions que es podien escollir. El model escollit és el Klima D9-0 (figura 3.18) del qual es mostren les seves característiques a la taula 3.11.



Figura 3.18: Motor Klima D9-0.

Klima D9-0	
Llargada	70 mm
Diàmetre	18 mm
Pes	33 g
Impuls específic	20 Ns
Temps de cremat	2.1 s

Taula 3.11: Especificacions del motor Klima D9-0 [6].

La corba d'empenta característica del motor es mostra a continuació remarcada en color blau (D-9) a la figura 3.19.

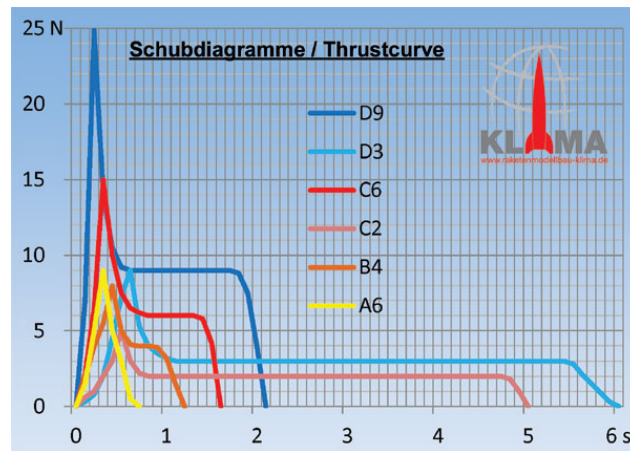


Figura 3.19: Corba d'empenta teòrica del motor Klima D9-0.

Com es pot observar és un motor bastant petit, de tan sols 9 N, però a nivell quantitatiu és suficient per a comprovar el funcionament de la bancada. Sobretot es pot comprovar el comportament en front a ràpides variacions d'empenta gràcies a la corba que presenta el motor.

3.3.2 Resultats

Realitzada la prova estàtica, els resultats es presenten a la figura 3.20. La gràfica s'ha obtingut a partir de la següent recta de conversió tenint en compte el pendent de la recta de calibratge obtinguda a l'apartat 3.2.6 i que les dades presenten un *offset* de 16141 punts de lectura. Com que la recta de calibratge està en grams, s'ha de realitzar la conversió a newtons.

$$T(N) = (2 \cdot Lectura - 3.23 \cdot 10^4) \cdot \frac{9.81 \text{ m/s}^2}{1000 \text{ g}}$$

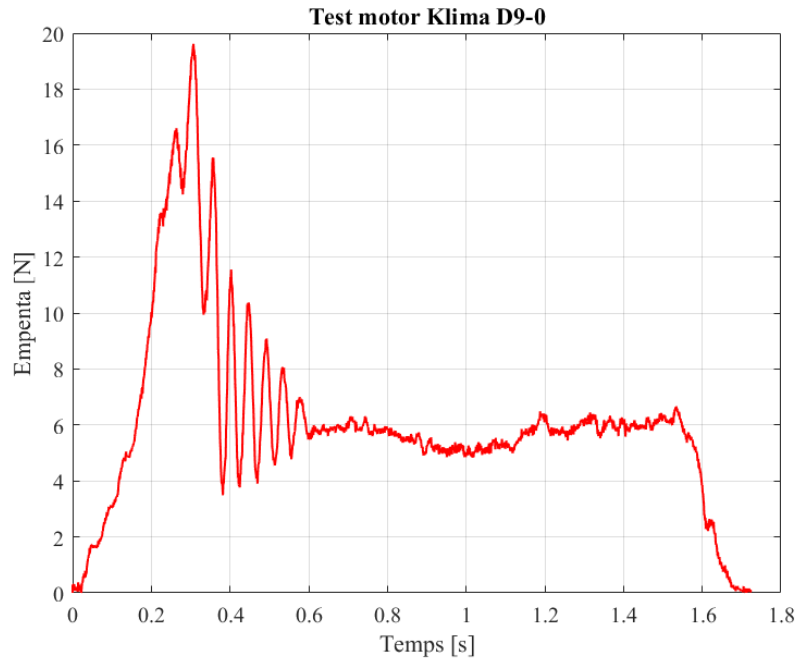


Figura 3.20: Corba d'empenta experimental del motor Klima D9-0.

A la gràfica s'observa com, en general, la forma que presenta la corba experimental és molt similar a la teòrica. Presenta una pic i després s'estabilitza en una empenta constant. Tot i així, hi ha diversos aspectes que diferencien ambdós corbes i que cal comentar.

En primer lloc es pot observar com la gràfica experimental es troba 5N per sota de la teòrica, aproximadament. Aquest fet es deu, molt probablement, a que s'esta treballant amb un motor d'una empenta molt petita i qualssevol desviació és molt apreciable. Per altra banda, s'observa com s'ha produït un efecte de ressonància durant la prova al aparèixer oscil·lacions bastant destacables en les lectures. Molt probablement la cèl·lula de càrrega utilitzada està dissenyada per a mesures estàtiques i presenta un excés d'elasticitat. Per a aquesta aplicació on es volen obtenir mesures dinàmiques, que la cèl·lula presenti elasticitat és un gran desavantatge.

En quant al temps de cremat, s'obtenen 1,7 segons respecte els 2,1 teòrics. Aquest fet presenta la mateixa justificació que el cas anterior. El procés de combustió d'un motor no és una ciència exacte i, per tant, pot ser que apareguin petites discrepàncies en els resultats. A més, si es tracta d'un motor petit aquestes s'accentuen encara més.

3.3.3 Conclusions

La principal conclusió que es dedueix dels resultats presentats és que la cèl·lula de càrrega utilitzada no és una bona opció per aquesta aplicació. Per tant, cal reemplaçar-la per una que presenti una major rigidesa i realitzar les corresponents modificacions de l'estructura de la bancada que això

comporti.

Per altra banda i com a punt a favor, la prova realitzada serveix per validar l'electrònica en quan a resolució i taxa de mostratge. El principal factor que justifica aquest fet és que en les lectures s'observa clarament el pic d'empenta que presenta el motor i, conseqüentment, es demostra que l'electrònica presenta una freqüència de lectura major que la freqüència de l'empenta a mostrejar.

3.4 MODIFICACIONS

Els resultats de la primera prova estàtica realitzada conclouen que és necessari reemplaçar la cèl·lula de càrrega degut a la elasticitat que aquesta presenta. En aquest apartat es detallen les modificacions i processos seguits per a realitzar aquest canvi.

3.4.1 Característiques de la cèl·lula de càrrega FX1901

A la taula 3.12 s'especifiquen les principals característiques de la cèl·lula de càrrega que es mostra a la figura 3.21.

Marca	TE Connectivity
Model	FX1901-0025
Càrrega nominal	25 lbf (11.34 kg)
Sensibilitat	20 mV/V
Excitació	5V DC
No linealitat	1 %
Histèresis	0.8 %
Sobrecàrrega límit	250% C.N.
Deflexió	0.05 mm a C.N.

Taula 3.12: Característiques de la cèl·lula de càrrega FX1901 [7].



Figura 3.21: Cèl·lula de càrrega model FX1901.

Aquest model de cèl·lula de càrrega presenta un sensibilitats de 20 mV/V. Si s'alimenta a 5V recomanats pel fabricant, s'obté una senyal de 100 mV quan s'apliquen 25 lbf, aproximadament. Quan aquesta s'amplifica amb un guany de 43 s'obtenen 4.3V, valor 10 vegades major que en el cas de l'anterior cèl·lula. Aquest fet permet augmentar en gran mesura la resolució del convertidor ADC.

3.4.2 Esquema de connexions

Les connexions entre l'Arduino MEGA, l'amplificador diferencial i l'ADC no es veuen modificades i es mantenen tal i com s'especifiquen a l'apartat 3.2.3. Les úniques connexions que es veuen alterades pel canvi de la cèl·lula de càrrega són les d'aquesta mateixa amb l'Arduino MEGA i l'amplificador.

L'esquema de cablejat de la cèl·lula de càrrega es mostra a la figura 3.22 i les corresponents connexions a la taula 3.6.

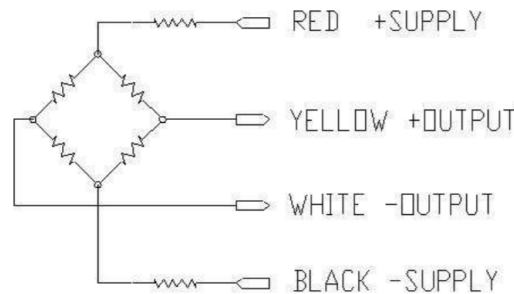


Figura 3.22: Esquema de cablejat de la cèl·lula de càrrega FX1901.

Arduino MEGA	
Vermell	5V
Negre	GND
Amplificador Diferencial	
Groc	AIN+
Blanc	AIN-

Taula 3.13: Connexió de la cèl·lula de càrrega FX1901 a l'electrònica.

3.4.3 Estructura

El canvi de la cèl·lula de càrrega ha comportat diverses modificacions de l'estructura de la bancada les quals s'especifiquen a continuació.

En primer lloc, la cèl·lula no està dissenyada per a subjectar-la amb una unió cargolada. Per aquest motiu s'ha dissenyat una superfície, formada per dos perfils d'acer soldats entre ells, on poder-la subjectar amb cinta adhesiva de doble cara.

Per altra banda, la nova cèl·lula, una vegada adherida a la nova superfície, es troba més enretirada de la part mòbil de la bancada (on queda subjecte el motor) i ambdós parts no entren en contacte fàcilment. La solució ha consistit en dissenyar una peça mecanitzada que treballa com una extensió de la part mòbil permeten que el moviment d'aquesta, causada per l'empenta del motor, es transmeti a la cèl·lula de càrrega. El plànol de la peça s'adjunta a l'annex E (plànol n^o4).

El resultat final de l'estructura es mostra a la figura 3.23.

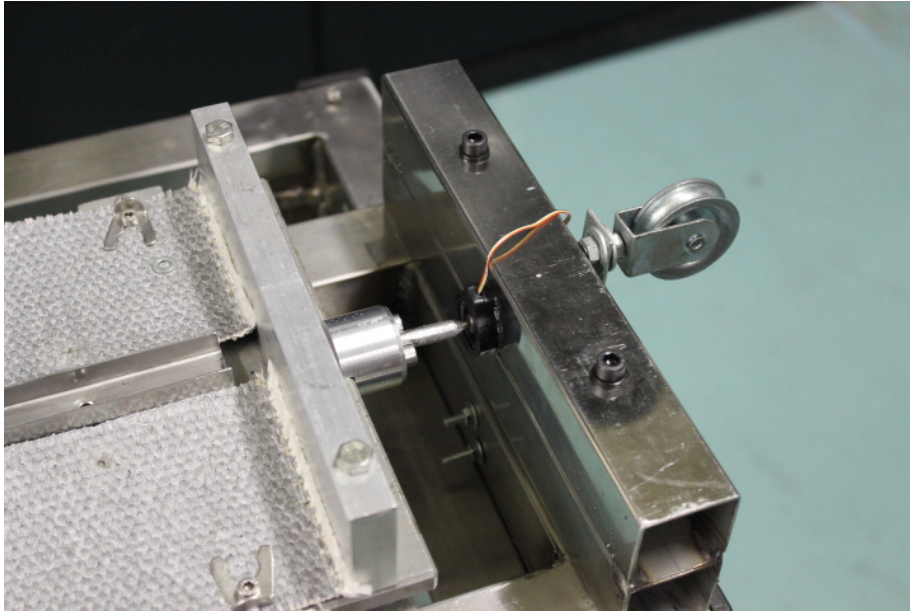


Figura 3.23: Modificació de l'estructura.

3.4.4 Calibratge de la cèl·lula de càrrega FX1901

Dutes a terme les corresponents modificacions per a adaptar la bancada a la nova cèl·lula de càrrega, aquesta cal calibrar-la per a poder utilitzar-la.

El calibratge de la nova cèl·lula de càrrega s'ha realitzat amb les mateixes condicions que en el cas anterior: amb la cèl·lula instal·lada a la bancada i amb el sistema format per una politja que s'especifica a l'apartat 3.2.6.

Cal indicar que el procediment que es descriu a continuació es mostra de manera més esquemàtica degut a que es segueix la mateixa metodologia que a l'apartat 3.2.6. En aquest la descripció dels passos seguits és molt més detallada.

Obtenció de dades

Tot i que aquest model de cèl·lula de càrrega presenta un rang de lectura més ampli, els patrons de calibratge utilitzats han sigut els mateixos que en el cas anterior. S'ha utilitzat 5 masses de 1

kg i una massa de 34 grams que contempla el ganxo i la bossa per a col·locar les diferents masses a l'extrem del cordill.

El procediment seguit per a la obtenció de dades ha sigut el mateix que en el cas anterior. Aquestes es mostren a la figura 3.14.

	0 g	34 g	1034 g	2034 g	3034 g	4034 g	5034 g
Lectura 1	17409	17410	19369	21660	23797	25910	27647
Lectura 2	17406	17411	19349	21658	23770	25850	27563
Lectura 3	17409	17410	19352	21670	23750	25771	27467
Lectura 4	17411	17411	19369	21644	23453	25732	27436
Lectura 5	17408	17411	19385	21640	23433	25677	27689
Lectura 6	17409	17410	19366	21650	23603	25572	27534
MITJANA	17408.7	17410.5	19365	21653.7	23634.3	25752	27556
SENSE ERROR DE 0	0	1.83	1956.3	4245	6225.7	8343.3	10147.3

Taula 3.14: Dades obtingudes per a cada una de les masses patró (FX1901).

Recta de calibratge

A partir de les dades sense error de 0 i dels diferents pesos de la taula 3.14 s'obté el gràfic de punts de la figura 3.24. D'aquí s'obté la recta de calibratge de l'electrònica a partir de la següent regressió lineal:

$$Massa(g) = 0.483 \cdot Lectura - 27.6$$

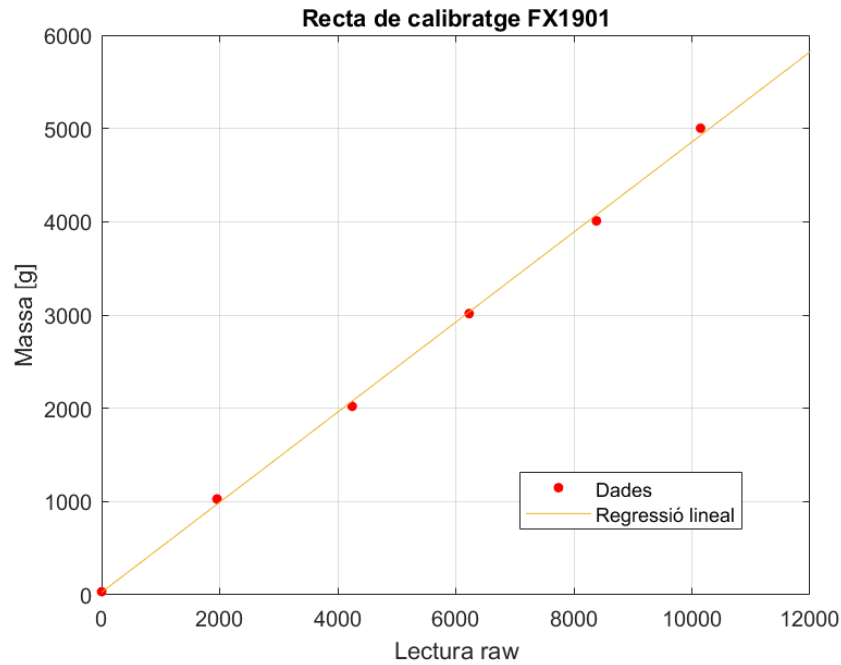


Figura 3.24: Recta de calibratge de la cèl·lula FX1901.

De la recta obtinguda, el pendent és la part que realment interessa. La intercepció amb la ordenada variarà lleugerament en funció de l'*offset* que presenti l'electrònica en el moment que s'utilitzi. En aquest cas, aquest valor també presenta variacions cada vegada que es connecta i desconnecta la cèl·lula de càrrega.

Resolució

Obtinguda la recta de calibratge, podem quantificar la variació mínima d'empenta apreciable per a l'electrònica a partir del pendent que aquesta presenta.

$$Pendent = 0.483 \text{ g} \approx 0.5 \text{ g} \approx 0.005 \text{ N}$$

L'electrònica presenta una resolució de 0.005 newton.

Càlcul d'incerteses

L'error que presenten els instruments de mesura utilitzats s'especifiquen a la taula 3.15.

BÀSCULA	
Resolució	0,1 grams
ELECTRÒNICA⁴	
Resolució	1 nivell de lectura <i>raw</i>
No linealitat	1 %
Histèresi	0.8 %

Taula 3.15: Errors dels instruments.

A continuació, a la taula 3.16, es mostra un resum del càlcul d'incerteses. La taula completa es troba a l'annex C (taula C.2) conjuntament amb el formulari per al càlcul de cada una de les variables.

Massa⁵ (g)	Lectura	SD⁶	RSS Bas. (%)	RSS Elec. (%)	Error Total (%)
0	0	1,63	-	-	-
33,8	1,83	0,55	0,296	59,57	59,57
1027,6	1956,3	13,10	0,010	1,39	1,39
2021,3	4245	11,13	0,005	1,30	1,30
3015,1	6225,7	162,88	0,003	2,45	2,45
4008,9	8343,3	121,12	0,002	1,73	1,73
5002,6	10147,3	98,82	0,002	1,50	1,50

Taula 3.16: Resum càlcul incerteses cèl · lula FX1901.

Finalment, l'error que presenta la recta de calibratge és igual a la mitjana aritmètica del conjunts d'errors totals de cada una de les mesures. Per tant, aquest és igual a 11.32 % de la mesura obtinguda.

L'electrònica presenta un error del 11.32 % en les mesures.

3.4.5 Especificacions de la electrònica amb la cèl · lula de càrrega FX1901

A la taula 3.17 es presenta un resum amb les principals característiques de l'electrònica amb el model de cèl · lula de càrrega FX1901.

Resolució	0.005 N
Taxa de mostratge	940 mostres/s
Pendent recta calibratge	0.483
Error	11.32 %

Taula 3.17: Especificacions de l'electrònica amb la cèl · lula de càrrega FX1901.

⁴Components electrònics i cèl · lula de càrrega.

⁵Corregida amb el cosinus de 6.4°.

⁶Desviació estàndard.

3.5 PROVA ESTÀTICA N°2

Realitzades les modificacions corresponents de la bancada per a l'adaptació de la nova cèl·lula de càrrega, cal realitzar una segona prova estàtica per a validar el seu funcionament. El conjunt de resultats i conclusions es desenvolupen a continuació.

3.5.1 Elecció del motor

El motor utilitzat es tracta del mateix que s'ha utilitzat en la prova estàtica n°1 (apartat 3.3). Les principals especificacions que presenta el motor Klima D9-0 i les consideracions tingudes en compte per a l'elecció d'aquest model es troben a l'apartat 3.3.1.

3.5.2 Resultats

Realitzada la prova estàtica, els resultats es presenten a la figura 3.25. La gràfica s'ha obtingut a partir de la següent recta de conversió tenint en compte el pendent de la recta de calibratge obtinguda a l'apartat 3.4.4 i que les dades presenten un *offset* de 17520 punts de lectura. Com que la recta de calibratge està en grams, s'ha de realitzar la conversió a newtons.

$$T(N) = (0.483 \cdot Lectura - 8.46 \cdot 10^3) \cdot \frac{9.81 \text{ m/s}^2}{1000 \text{ g}}$$

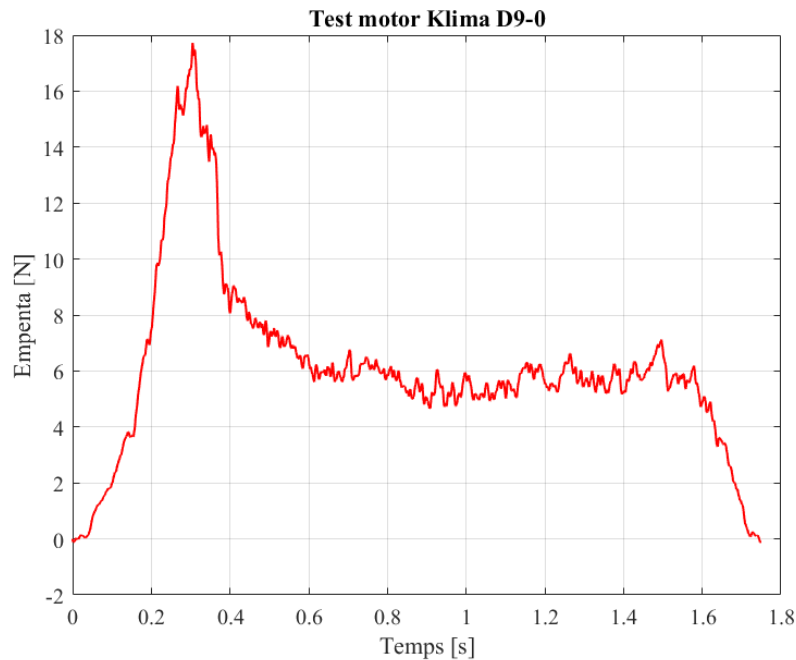


Figura 3.25: Corba d'empenta experimental del motor Klima D9-0 (prova estàtica n°2).

Com es pot observar a la gràfica d'empenta mostrada, és evident que amb el canvi de la cèl·lula de càrrega s'ha aconseguit millorar els resultats i eliminar els efectes de ressonància que apareixien en el cas de la prova estàtica nº1. Cal comentar, però, que en aquest cas les dades obtingudes han estat tractades per eliminar efectes de soroll. Amb l'objectiu de reduir-lo s'ha realitzat la mitjana mòbil de cada 10 mesures d'empenta obtingudes.

A nivell de valors d'empenta, s'obtenen pràcticament els mateixos resultats que en el cas anterior. No s'arriba als valors dels resultats teòrics però la gràfica presenta la mateixa forma: un pic d'empenta de fins a 18 N en els primers instants de temps i després s'estabilitza al voltant dels 6N.

El temps de cremat també s'aproxima en gran mesura al obtingut a la prova anterior. S'obtenen 1.7 segons de cremat, aproximadament.

3.5.3 Conclusions

La segons prova estàtica realitzada valida el canvi de cèl·lula de càrrega realitzat al no obtenir-se efectes de ressonància en les lectures d'empenta.

Per contra, els resultats presenten una major quantitat de soroll que el cas anterior. Aquest fet es deu possiblement a que s'està utilitzant la mateixa electrònica i la sensibilitat de la nova cèl·lula de càrrega és 10 vegades major que l'anterior. El model FX1901 té una sensibilitat de 20 mV/V i, el model LCS-D1, 2 mV/V. Una millora a implementar per eliminar aquest efecte és el disseny d'un filtre a partir d'un circuit de condensadors o obtenir una cèl·lula de càrrega de millor qualitat i amb millors prestacions.

Per altra banda, que s'obtinguin els mateixos valors d'empenta en les dues proves, aproximadament, serveix per a validar el procediment de calibratge en ambdós casos.

Capítol 4

RESULTATS

Índex

4.1	RESUM ECONÒMIC	46
4.1.1	Cost tècnic de redacció del projecte	46
4.1.2	Cost d'execució del projecte	47
4.2	IMPLICACIONS AMBIENTALS	48
4.2.1	Material ignífug	48
4.2.2	Components electrònics	49
4.2.3	Combustió motor de coet	49
4.3	PLANIFICACIÓ I PROGRAMACIÓ	49
4.4	CONCLUSIONS I RECOMANACIONS	50

4.1 RESUM ECONÒMIC

Els aspectes econòmics de la realització del projecte s'especifiquen a continuació.

4.1.1 Cost tècnic de redacció del projecte

El cost tècnic de redacció del projecte s'especifica a la taula 4.1. La distribució d'hores és aproximada però la gran part d'aquestes s'han dedicat a la realització de l'electrònica i a l'elaboració dels documents que resumeixen les tasques realitzades durant el projecte.

Activitat	Duració (hores)	Cost hora (€/hora)	Cost total (€)
Realització del pla d'execució	25	10	250
Cerca d'informació	30	10	500
Finalització de l'estructura	50	10	1000
Realització de la electrònica	250	10	1750
Realització de la prova estàtica	50	10	1250
Elaboració dels documents de l'estudi	180	10	1100
Seguiment de la programació	15	10	150
TOTAL	600	10	6000

Taula 4.1: Especificació del cost tècnic de redacció del projecte.

4.1.2 Cost d'execució del projecte

El cost d'execució del projecte s'especifica a la taula 4.2. En aquesta només s'inclouen els materials utilitzats a partir de l'inici del projecte. Costos com el de la fabricació de l'estructura de la bancada, per exemple, queden exclosos de la llista. Tampoc s'inclouen els costos de transport però cal indicar que, en el cas d'alguns materials sobretot en els electrònics, aquests són elevats degut a que provenen de l'estranger.

		Cost unitari (€)	Quantitat	Total (€)
Estructura	Cargol M8	0.30	4	1.20
	Arandela	0.15	4	0.60
	Protecció gasos	48.92	1	48.92
	TOTAL ESTRUCTURA			50.72
Electrònica	Arduino MEGA 2560 Rev3	35.00	1	35.00
	Amplificador Diferencial	25.00	1	25.00
	ADC AD7606	36.60	1	36.60
	Conector rosca 4C femella	2.97	1	2.97
	Jumper M/M (pack 40 unitats)	4.75	1	4.75
	Jumper H/H (pack 40 unitats)	4.75	1	4.75
	Jumper M/H (pack 40 unitats)	6.66	1	6.66
	Cèl·lula de càrrega FX1901-0025	26.85	1	26.85
	TOTAL ELECTRÒNICA			142.58
Prova estàtica	Motor Klima D9-0 (pack 6 unitats)	27.99	1	27.99
	Pila 9V	4.25	1	4.25
	TOTAL PROVA ESTÀTICA			32.24
TOTAL				225.54

Taula 4.2: Especificació del cost d'execució del projecte.

4.2 IMPLICACIONS AMBIENTALS

Tenint en compte que la societat d'avui en dia està afectant molt negativament al medi ambient, cal ser conscient de les implicacions ambientals que suposa la realització d'un projecte. Es per això que, a continuació, es detallen alguns dels aspectes més destacats sobre aquesta temàtica relacionats amb aquest projecte.

4.2.1 Material ignífug

L'impacte que suposa la utilització del material ignífug WELD SX és reduït. Els materials que el conformen són en gran part reciclables com són la silicona, la qual no és tòxica, i la fibra de vidre. Aquesta última, a més a més, pot ser fabricada a partir de vidre reciclat (utilitzant al voltant del 40 % de la massa total del producte [13]) contribuint d'aquesta manera a la millora del medi ambient.

4.2.2 Components electrònics

La utilització en si de components electrònics no suposa cap perill per al medi ambient. El perill apareix quan la seva vida útil acaba, cal desfer-se d'ells i acaben en un abocador convencional. Principalment, les substàncies que es troben en els components electrònics són el cadmi, el plom i el seleni [14]. Quan aquestes entren en contacte directe amb el sòl i l'aigua es desprenen i tenen grans efectes en el medi ambient i en la salut de les persones i animals.

El cadmi pot causar irritació als ulls i al tacte respiratori. La inhalació del fum pot originar edema pulmonar y febre. Aquesta substància és cancerígena pels éssers humans. Normalment es troba als circuits impresos i a les bateries recarregables de níquel-cadmi. Per altra banda, el plom pot causar greus efectes a la salut dels animals per enverinament i, fins i tot, la mort per una aturada cardiorespiratòria. Normalment es troba a les soldadures i a les bateries. Finalment el seleni, el qual es considera un element perillós pels animals aquàtics en dissoldres amb l'aigua, forma part dels circuits impresos.

Per tant, dur a terme un mal reciclatge d'aquest tipus de components comporta posar en risc la salut de les persones, dels animals i de l'ambient.

4.2.3 Combustió motor de coet

El principal problema que presenta la combustió d'un motor és la emissió de CO_2 que es produeix durant el procés. En aquest cas es tracta d'un motor petit i la combustió es realitza durant un instant de temps molt reduït, per tant, la quantitat de CO_2 emesa no és gaire elevada. Tot i així, cal indicar-ho.

Per altra banda, tot i que les dades del fabricant del motor Klima D9-0 no són gaire concises, es dedueix que aquest utilitza com a propel·lent una combinació de perclorat d'amoni i un polímer el qual no s'especifica. El perclorat d'amoni no és un combustible però s'utilitza perquè facilita la combustió d'altres substàncies [15]. El problema que presenta però, és que durant el procés de combustió, emet gasos tòxics i irritants que és recomanable no entrar-hi en contacte. A més, cal prestar atenció durant la seva manipulació en el procés de fabricació dels motors per evitar fuites que poden afectar especialment als animals.

4.3 PLANIFICACIÓ I PROGRAMACIÓ

La planificació de la distribució de tasques del projecte es presenta a l'annex D amb un diagrama de Gantt on també s'hi especifica la relació de dependències que hi ha entre elles.

A nivell general s'ha seguit la planificació que s'especifica al Gantt tot i que hi ha hagut algunes modificacions sobretot en el cas de l'electrònica. Aquesta alteració de la planificació de l'electrònica s'ha degut, principalment, als elevats terminis d'entrega dels components obtinguts de l'estranger. L'endarreriment en la execució de la electrònica també ha afectat a la realització de la prova estàtica però s'ha mantingut dintre dels terminis definits. Gràcies a aquest fet s'ha disposat de temps suficient per a fer les modificacions una vegada obtinguts els resultats de la primera prova

poc satisfactoris. S'ha tingut temps per a canviar la cèl·lula de càrrega i realitzar una petita modificació de l'estructura per a poder adaptar-la a la bancada.

4.4 CONCLUSIONS I RECOMANACIONS

La finalitat d'aquest projecte ha estat completar i posar en funcionament una bancada de prova de motors parcialment construïda. El desenvolupament del projecte ha contemplat la realització d'un estudi de seguretat, la implementació de l'electrònica i la realització de proves d'ignició que permetin verificar el funcionament del conjunt de la bancada.

A nivell de seguretat, les simulacions d'impacte han validat les proteccions que presenta la bancada en cas de fallada d'un motor. Aquestes s'han dut a terme considerant les dimensions i condicions de treball de motors de fins a 50N d'empenta. Per tant, en el cas de que posteriorment es volguessin testejar motors d'una major empenta caldria repetir-les.

Per altra banda, l'estructura de la bancada ha estat protegida dels gasos d'escapament en aquelles parts més exposades mitjançant material ignífug. El material ha passat amb gran èxit les proves d'ignició aïllant perfectament la flama de l'estructura. Els residus que es dipositen sobre el material durant la combustió poden ser retirats una vegada aquesta finalitza i el material ignífug queda en bones condicions per a tornar a ser utilitzat.

Quant a l'electrònica, les proves estàtiques realitzades han provocat que aquesta s'hagi vist sotmesa a un procés iteratiu. El primer disseny comptava amb la cèl·lula de càrrega que es trobava instal·lada a la bancada abans d'iniciar el projecte. Aquesta presentava un excés d'elasticitat i, en front a ràpides variacions d'empenta, es produïen efectes de ressonància en les lectures. Per a eliminar aquest efecte s'ha decidit canviar la cèl·lula de càrrega per una que presenta major rigidesa.

Les lectures obtingudes amb la segona cèl·lula de càrrega han presentat millors resultats i s'ha aconseguit eliminar els efectes de ressonància. Per contra, ha augmentat el soroll que presenten les dades degut a que es tracta d'una cèl·lula de baix cost d'adquisició combinada amb una elevada sensibilitat. Per tant, una futura millora de l'electrònica passaria per adquirir una cèl·lula de càrrega de millor qualitat i, conseqüentment, amb millors prestacions.

Tot i així, el fet de que els errors de l'electrònica de la bancada s'hagin degut a la cèl·lula de càrrega, valida la utilització de plataformes de creació d'electrònica de codi obert, com pot ser Arduino en aquest cas. És evident que presenta les seves limitacions però aquestes es poden solucionar a partir de complements externs. En aquest cas s'ha utilitzat un ADC extern de 16 bits, combinat amb un amplificador diferencial, el qual ha permès obtenir una taxa de mostreig elevada, si es compara amb la que es podria haver obtingut a partir del propi ADC que presenta l'Arduino.

Finalment s'ha aconseguit assolir l'objectiu del projecte, posar en funcionament la bancada de la ESEIAAT, així com facilitar la seva utilització a partir d'una guia detallada que es troba accessible a tothom que ho desitgi.

Apèndix A

Codi Arduino

```
1 /*
2 Aquest codi forma part del treball final de grau "ESTUDI I IMPLEMENTACIO
3 DE SISTEMES AUXILIARS EN UNA BANCADA DE PROVA DE MOTORS COET" realitzat
4 per l'alumne Joan Costa Garcia. La bancada es troba al laboratori
5 d'aeronautica de l'Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial,
6 i Audiovisual de Terrassa (ESEIAAT).
7
8 El codi permet obtenir les lectures de la cellula de carrega a partir d'un
9 arduino MEGA, un ADC AD7606 i un amplificador diferencial.
10
11 Aquest codi pot ser descarгат al seguent URL:
12 https://github.com/jcostagarcia/TFG-BANCADA-ESEIAAT
13 */
14
15 #include <EnableInterrupt.h> // Permet realitzar interrupcions en un pin
    concret
16
17 // Es defineixen els pins
18 #define BUSY 3
19 #define RD_ 4 // RD.+CS_ units
20 #define RST 5
21 #define CONVST 6 // CONVSTA+CONVSTB units
22 #define OS0 8
23 #define OS1 9
24 #define OS2 10
25
26 #define DB0 14
27 #define DB1 15
28 #define DB2 16
29 #define DB3 17
30 #define DB4 18
31 #define DB5 19
32 #define DB6 20
33 #define DB7 21
34 #define DB8 22
35 #define DB9 23
36 #define DB10 24
37 #define DB11 25
38 #define DB12 26
```



```
39 #define DB13 27
40 #define DB14 28
41 #define DB15 29
42
43 // Es declara un array de 16 enters
44 int rawData[16];
45
46 void setup() {
47
48     // Es defineix la funcio a realitzar durant la interrupcio (ISR_)
49     enableInterrupt(BUSY, ISR_, FALLING);
50
51     // Es defineixen les entrades i sortides
52     pinMode(RD_, OUTPUT);
53     pinMode(RST, OUTPUT);
54     pinMode(CONVST, OUTPUT);
55     pinMode(BUSY, INPUT);
56
57     pinMode(OS0, OUTPUT);
58     pinMode(OS1, OUTPUT);
59     pinMode(OS2, OUTPUT);
60
61     // Es defineix la velocitat de transmissio de dades
62     Serial.begin(115200);
63
64     // Es reseteja l'ADC per a comencar la conversio
65     digitalWrite(RST, HIGH);
66     delayMicroseconds(10);
67     digitalWrite(RST, LOW);
68
69     // S'estableixen els pins de l'oversampling a zero
70     digitalWrite(OS0, LOW);
71     digitalWrite(OS1, LOW);
72     digitalWrite(OS2, LOW);
73
74     // S'estableixen els estats inicials de la resta de pins
75     digitalWrite(CONVST, LOW);
76     digitalWrite(RD_, HIGH);
77     digitalWrite(BUSY, LOW);
78
79     delayMicroseconds(1000);
80
81 }
82
83 void loop() {
84
85     // S'atura la interrupcio
86     disableInterrupt(BUSY);
87
88     // delayMicroseconds(40000);
89
90     // S'inicialitza la conversio i es produeix la interrupcio
91     digitalWrite(CONVST, LOW);
92     delayMicroseconds(10);
93     digitalWrite(CONVST, HIGH);
94     enableInterrupt(BUSY, ISR_, FALLING);
95
96 }
```

```

97
98 // Es defineix la funcio a realitzar durant la interrupcio del pin BUSY
99 void ISR_ () {
100
101     delayMicroseconds(1);
102     digitalWrite(RD_, LOW); // Per a poder fer la lectura el pin RD_ (negat) ha d
        'estar actiu
103     delayMicroseconds(1);
104     lecturaDBpins(); // Es crida la funcio que realitza la conversio
105     digitalWrite(RD_, HIGH);
106
107     /*
108     L'ADC permet llegir de forma parallela fins a 8 entrades analogiques. En el
109     cas que es vulguin utilitzar, s'ha de copiar i enganxar a continuacio les
110     anteriors 5 linies de codi dins de la funcio ISR_ tantes vegades com
111     entrades
112     analogiques es requereixin.
113     */
114     Serial.println(" ");
115 }
116
117 // Es defineix la funcio encarregada de fer la conversio a partir de l'array
118     rawData
119 void lecturaDBpins()
120 {
121     rawData[0] = digitalRead(DB15);
122
123     if (rawData[0] > 0) {rawData[0] = 32768;}
124     rawData[1] = digitalRead(DB14);
125
126     if (rawData[1] > 0) {rawData[1] = 16384;}
127     rawData[2] = digitalRead(DB13);
128
129     if (rawData[2] > 0) {rawData[2] = 8192;}
130     rawData[3] = digitalRead(DB12);
131
132     if (rawData[3] > 0) {rawData[3] = 4096;}
133     rawData[4] = digitalRead(DB11);
134
135     if (rawData[4] > 0) {rawData[4] = 2048;}
136     rawData[5] = digitalRead(DB10);
137
138     if (rawData[5] > 0) {rawData[5] = 1024;}
139     rawData[6] = digitalRead(DB9);
140
141     if (rawData[6] > 0) {rawData[6] = 512;}
142     rawData[7] = digitalRead(DB8);
143
144     if (rawData[7] > 0) {rawData[7] = 256;}
145     rawData[8] = digitalRead(DB7);
146
147     if (rawData[8] > 0) {rawData[8] = 128;}
148     rawData[9] = digitalRead(DB6);
149
150     if (rawData[9] > 0) {rawData[9] = 64;}
151     rawData[10] = digitalRead(DB5);

```

```
152
153   if (rawData[10] > 0) {rawData[10] = 32;}
154   rawData[11] = digitalRead(DB4);
155
156   if (rawData[11] > 0) {rawData[11] = 16;}
157   rawData[12] = digitalRead(DB3);
158
159   if (rawData[12] > 0) {rawData[12] = 8;}
160   rawData[13] = digitalRead(DB2);
161
162   if (rawData[13] > 0) {rawData[13] = 4;}
163   rawData[14] = digitalRead(DB1);
164
165   if (rawData[14] > 0) {rawData[14] = 2;}
166   rawData[15] = digitalRead(DB0);
167
168   if (rawData[15] > 0) {rawData[15] = 1;}
169
170   // S'imprimeix temps i lectura per a poder graficar els resultats
171   Serial.print ( millis() );
172   Serial.print ( ", " );
173   Serial.print ( rawData[0]+rawData[1]+rawData[2]+rawData[3]+rawData[4]+rawData[
      5]+rawData[6]+rawData[7]+rawData[8]+rawData[9]+rawData[10]+rawData[11]+
      rawData[12]+rawData[13]+rawData[14]+rawData[15]-16365) );
174 }
```

Listing A.1: Codi electrònica.

Apèndix B

Codi MATLAB per a imprimir resultats

```
1 %  
2 % CODI PER IMPRIMIR RESULTATS DE LA BANCADA DE LA ESEIAAT  
3 %  
4  
5 % Aquest codi permet imprimir els resultats obtinguts en l'arxiu .txt de la  
6 % prova estatica realitzada. A partir de l'apartat INPUTS s'ha d'indicar  
7 % l'offset que presenten els resultats d'empenta i es pot restringir els  
8 % instants de temps graficats a partir de les variables t_inicial i  
9 % t_final.  
10  
11 % Aquest codi pot ser descargar en el següent URL:  
12 % https://github.com/jcostagarcia/TFG-BANCADA-ESEIAAT  
13  
14 % ***NOTES IMPORTANTS***  
15 % 1. Cal que l'arxiu estigui en format .txt. Si es troba en el format .log,  
16 % cal obrir-lo i tornar-lo a desar amb format .txt.  
17 % 2. La primera columna de l'arxiu .txt es el temps el milisegons i la  
18 % segona l'empenta del motor amb lectura raw (la conversio a newtons es fa  
19 % sola a partir del codi).  
20 % 3. Cal eliminar les primeres línies de l'arxiu .txt fins que la primera  
21 % línia sigui igual a 1 milisegon.  
22 % 4. Si salta l'error "Number of columns must be the same as previous  
23 % lines", cal eliminar la línia que s'indica.  
24 % 5. No modificar altres parts del codi que no formin part de l'apartat  
25 % INPUTS.  
26 % 6. Si es te algun dubte consultar la guia d'utilitzacio de la bancada.  
27  
28 clear;  
29 close all;  
30  
31 %% INPUTS  
32 dades = load ('nom_arxiu.txt'); % Introduir el nom de l'arxiu .txt generat. Ha d'  
    estar a la mateixa carpeta que el codi.  
33 offset = X; % Introduir valor d'offset que presenten les dades (el que mes es  
    repeteixi). Sol estar per sobre de 16000.
```

```
34 t_inicial = X; % Introduir instant inicial de la grafica (milisegons). El valor ha
    de ser el de l'arxiu .txt (primera columna).
35 t_final = X; % Introduir instant final de la grafica (milisegons). El valor ha de
    ser el de l'arxiu .txt (primera columna).
36
37 %% CALCULS
38 [m,n] = size(dades);
39 temps = zeros(1,t_final-t_inicial);
40 empenta = zeros (1,t_final-t_inicial);
41 for i = 1:m
42     if (dades (i,1) >= t_inicial) && (dades (i,1) <= t_final)
43         temps (1,i) = (dades (i,1)-t_inicial)/1000;
44         empenta (1,i) = (dades (i,2)*0.483-0.483*offset)/1000*9.81;
45     end
46 end
47
48 %% IMPRIMIR RESULTATS
49 plot (temps, empenta, 'r', 'LineWidth',1)
50 grid on
51 xlabel ('Temps [s]');
52 ylabel ('Empenta [N]');
```

annexes/matlab/codimatlablatex.m

Apèndix C

Taula d'errors del calibratge

Massa (g)	Lectura	SD	Res. Bas. (g)	RSS Bas. (%)	Res. Elec.	Lin+His+Rep	Interval	RSS Elec.	RSS Elec. (%)	Error total (%)
0	0	1,47	0,1	-	1	0	1,18	1,55	-	-
33,8	21,5	1,63	0,1	0,296	1	0,43	1,31	1,70	7,91	7,92
1027,6	568,8	11,33	0,1	0,010	1	11,38	9,07	14,58	2,56	2,56
2021,3	1040,3	5,61	0,1	0,005	1	20,81	4,49	21,31	2,05	2,05
3015,1	1526,3	8,02	0,1	0,003	1	30,53	6,42	31,21	2,04	2,04
4008,9	2025	20,29	0,1	0,002	1	40,50	16,24	43,65	2,16	2,16
5002,6	2530	11,07	0,1	0,002	1	50,60	8,86	51,38	2,03	2,03

Taula C.1: Càlcul d'incerteses del calibratge de la electrònica amb la cèl · lula de càrrega LCS-D1.

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

$$RSS.Bas.(%) = \frac{Res.Bas.}{Massa} \cdot 100$$

$$Lin + His + Rep = 0.02 \cdot Lectura$$

$$RSS Elec. = \sqrt{(Res.Elec.)^2 + (Lin + His + Rep)^2 + (Interval)^2}$$

$$RSS.Elec.(%) = \frac{RSS Elec.}{Lectura} \cdot 100$$

$$Error total(%) = \sqrt{(RSS Bas.)^2 + (RSS Elec.)^2}$$

$$Interval = 1.96 \frac{SD}{\sqrt{N}}$$

Massa (g)	Lectura	SD	Res. Bas. (g)	RSS Bas. (%)	Res. Elec.	No Lin.	His.	Interval	RSS Elec.	RSS Elec. (%)	Error Total (%)
0	0	1,63	0,1	-	1	0	0	1,31	1,65	-	-
33,8	1,83	0,55	0,1	0,296	1	0,02	0,01	0,44	1,09	59,57	59,57
1027,6	1956,33	13,10	0,1	0,010	1	19,56	15,65	10,48	27,18	1,39	1,39
2021,3	4245	11,13	0,1	0,005	1	42,45	33,96	8,91	55,10	1,30	1,30
3015,1	6225,67	162,88	0,1	0,003	1	62,26	49,81	130,33	152,78	2,45	2,45
4008,9	8343	121,12	0,1	0,002	1	83,43	66,75	96,92	144,26	1,73	1,73
5002,6	10147	98,82	0,1	0,002	1	101,47	81,18	79,07	152,12	1,50	1,50

Taula C.2: Càlcul d'incerteses del calibratge de la electrònica amb la cèl · lula de càrrega FX1901.

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

$$RSS.Bas.(%) = \frac{Res.Bas.}{Massa} \cdot 100$$

$$No Lin. = 0.01 \cdot Lectura$$

$$His. = 0.008 \cdot Lectura$$

$$Interval = 1.96 \frac{SD}{\sqrt{N}}$$

$$RSS Elec. = \sqrt{(Res.Elec.)^2 + (No Lin)^2 + (His.)^2 + (Interval)^2}$$

$$RSS.Elec.(%) = \frac{RSS Elec.}{Lectura} \cdot 100$$

$$Error total(%) = \sqrt{(RSS Bas.)^2 + (RSS Elec.)^2}$$

Apèndix D Diagrama de Gantt

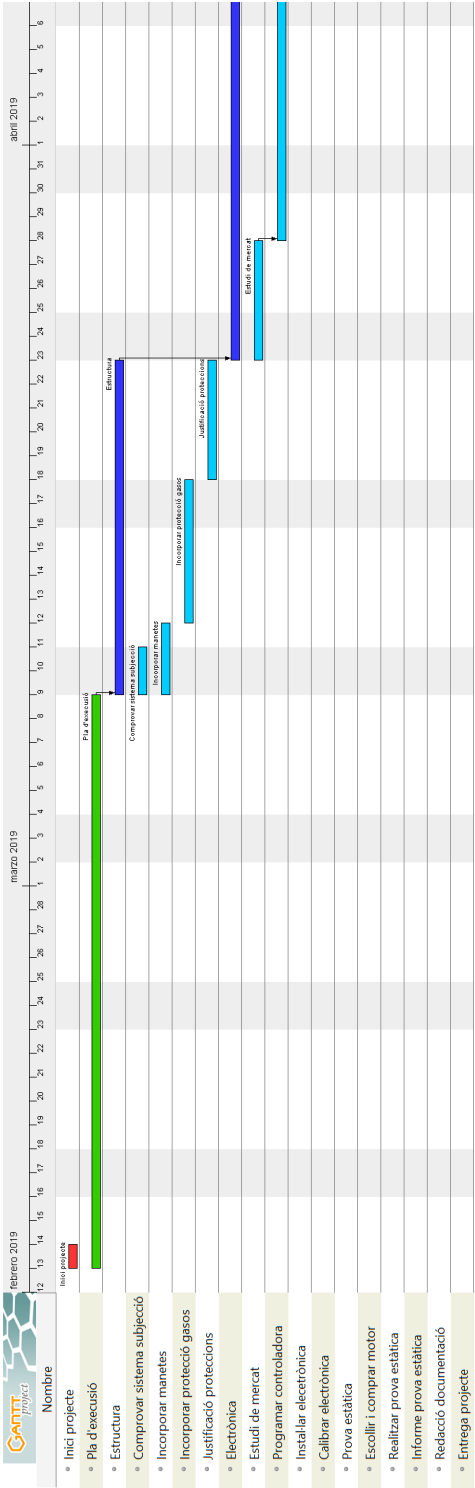


Figura D.1: Diagrama de Gantt.

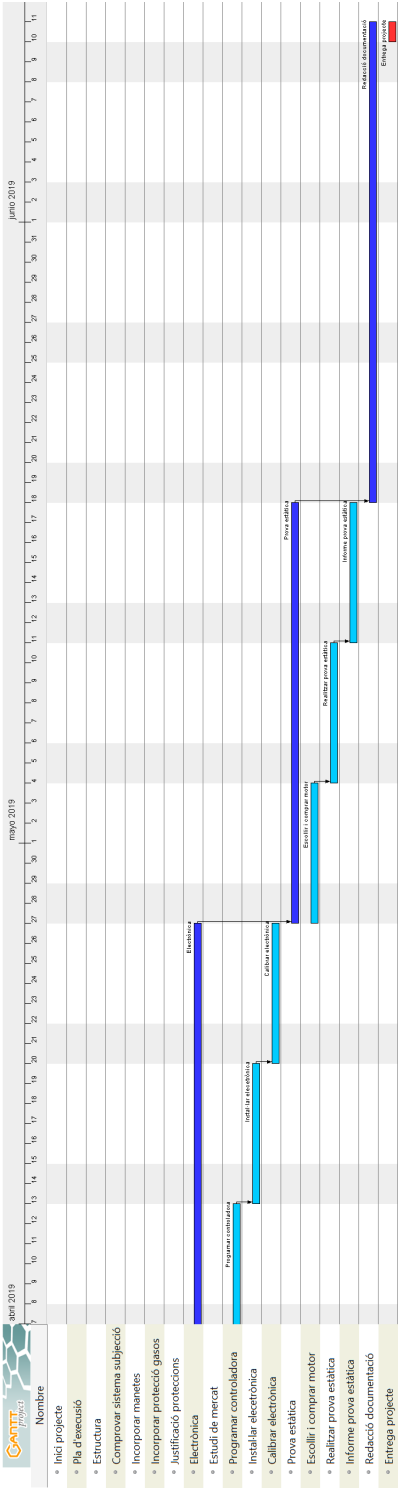
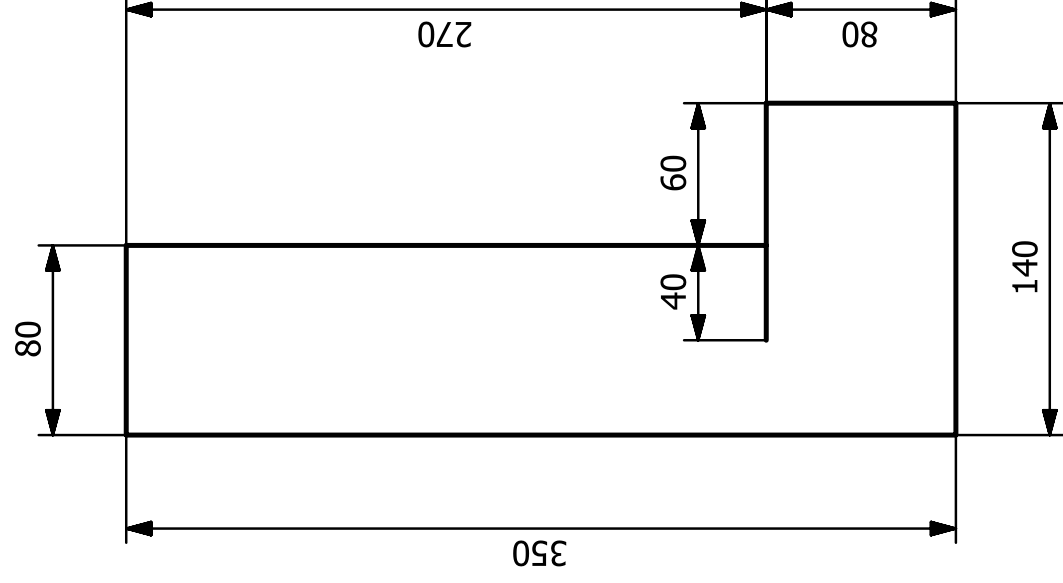


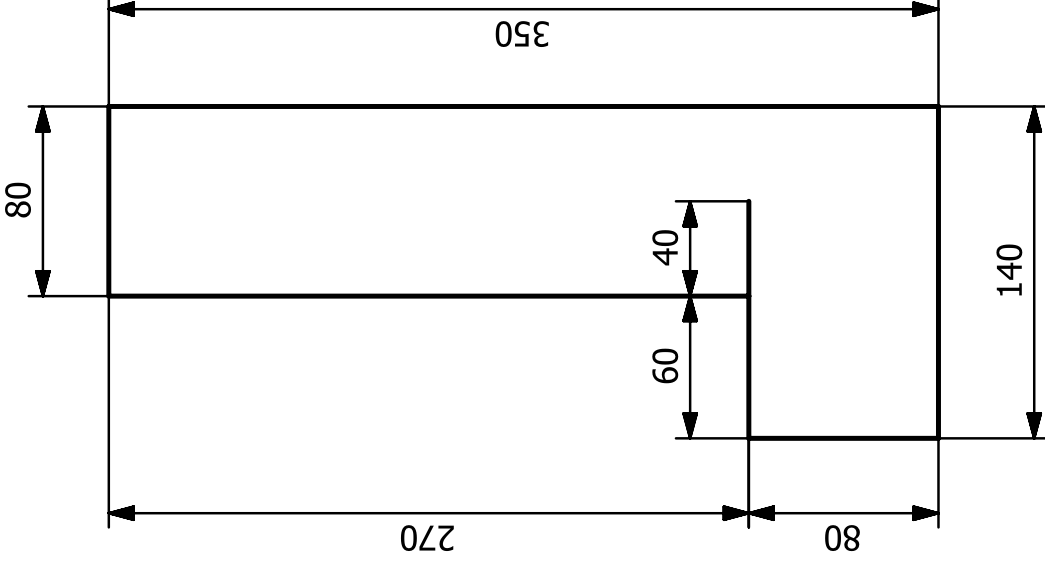
Figura D.2: Diagrama de Gantt.

Apèndix E

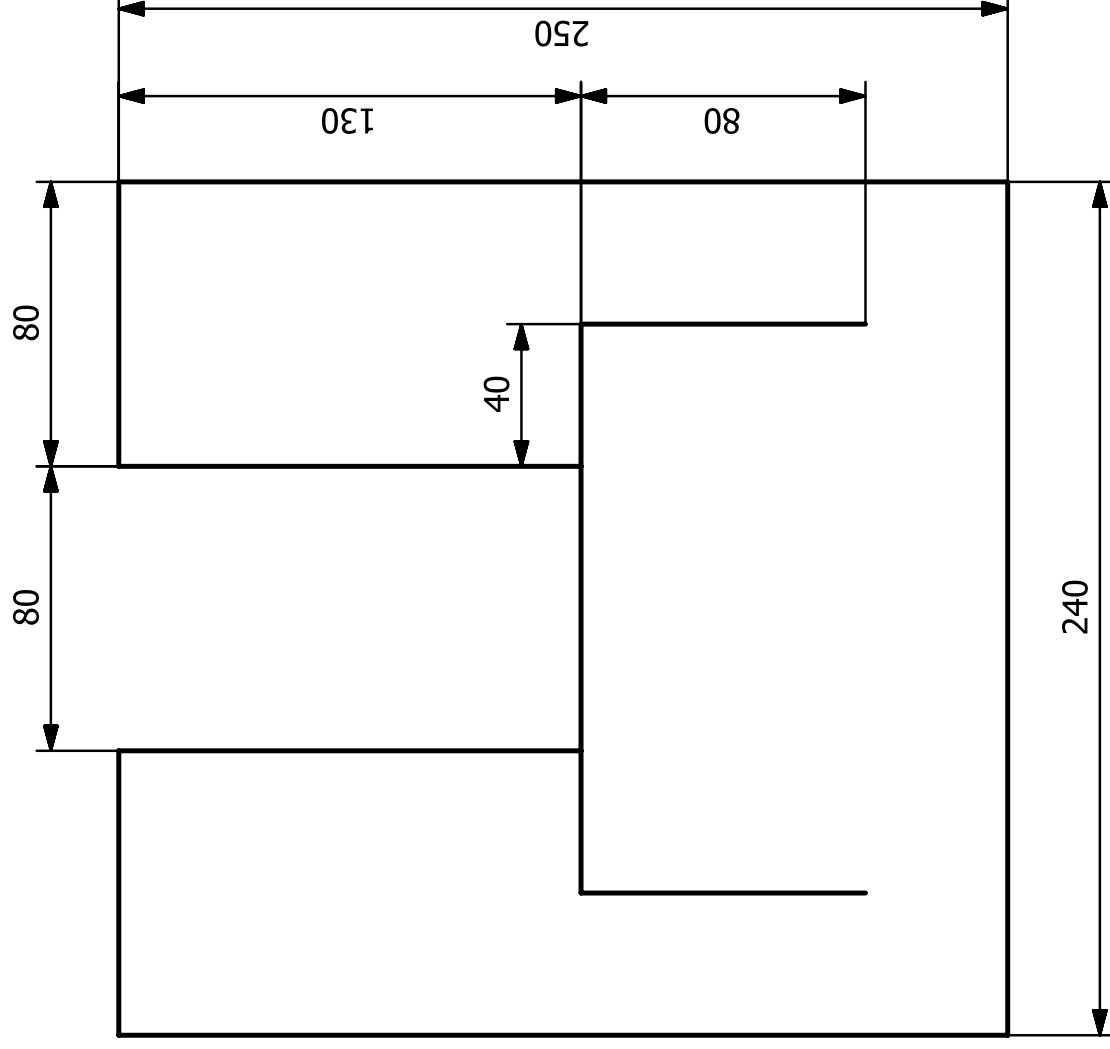
Plànols



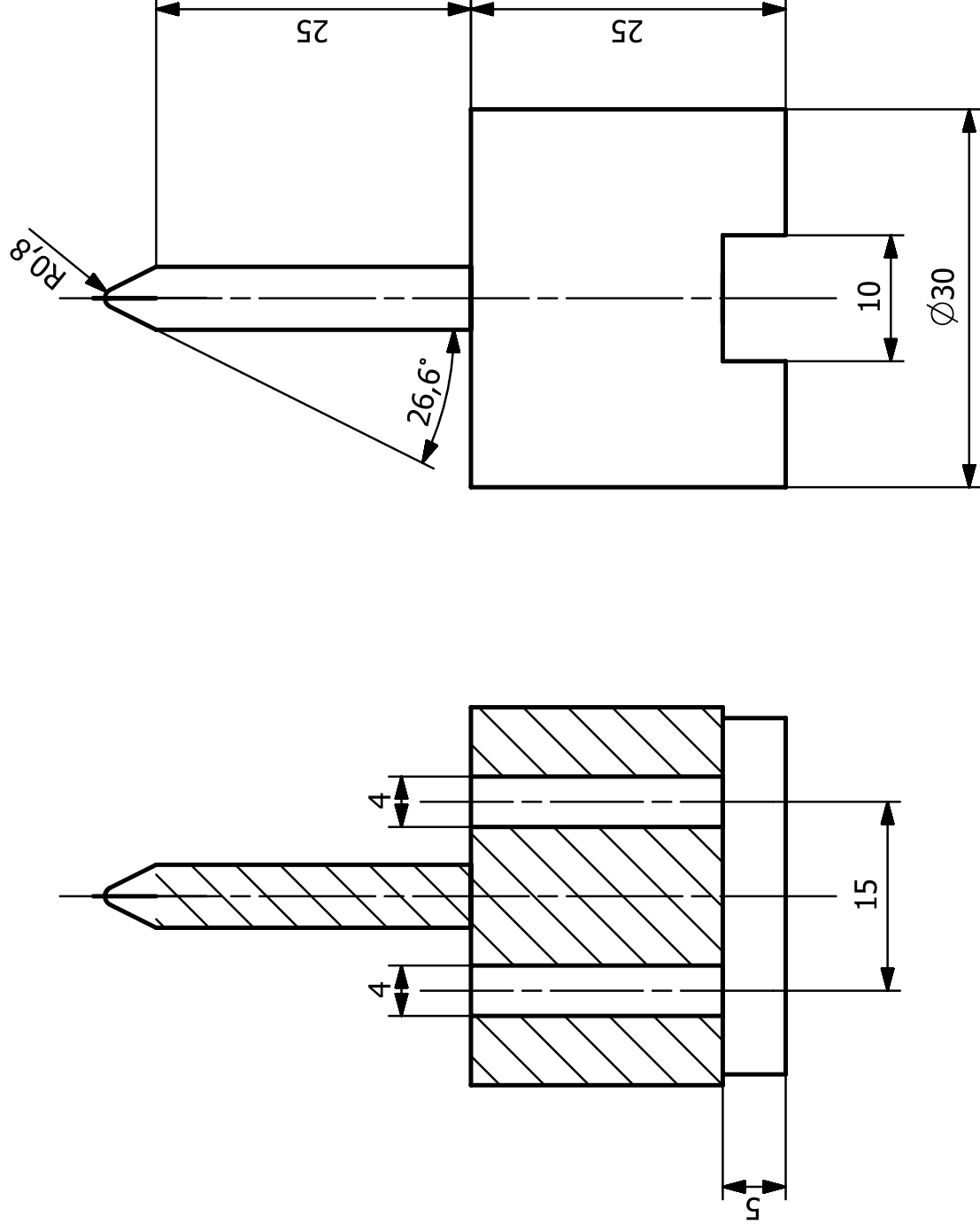
ESCALA	PROTECCIÓ IGNÍFUGA			AUTOR	JOAN COSTA GARCIA
	BANCADA LATERAL			DATA	02/06/2019
	ESQUERRA			Nº PLANO	1



ESCALA	PROTECCIÓ IGNÍFUGA		AUTOR	JOAN COSTA GARCIA
	BANCADA LATERAL		DATA	02/06/2019
	DRETA		Nº PLANO	2



ESCALA	PROTECCIÓ IGNÍFUGA		AUTOR	JOAN COSTA GARCIA
	BANCADA CENTRE		DATA	02/06/2019
	1:2		Nº PLANO	3



ESCALA	ADAPTACIÓ BANCADA			AUTOR	JOAN COSTA GARCIA
	2:1			DATA	08/06/2019
				Nº PLANO	4

Apèndix F

Guia d'utilització de la bancada



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH**

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa (ESEIAAT)

GUIA D'UTILITZACIÓ DE LA BANCADA PER A MOTORS COET DE LA ESEIAAT

Treball realitzat per Joan Costa Garcia estudiant del grau en Enginyeria en
Vehicles Aeroespacials

Supervisat per:

Jaume Solé Bosquet
Manel Soria Guerrero

INTRODUCCIÓ

Aquest document forma part del treball de final de grau "ESTUDI I IMPLEMENTACIÓ DE SISTEMES AUXILIARS EN UNA BANCADA DE PROVA DE MOTORS COET" realitzat per l'alumne Joan Costa Garcia. El projecte s'ha dut a terme amb la finalitat de posar en funcionament la bancada per a motors de coet que es troba situada al laboratori d'aeronàutica de la Escola Superiors d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa (ESEIAAT), de forma que aquesta sigui accessible tan a professorat com alumnat.

El projecte s'ha iniciat amb l'estructura de la bancada realitzada pel Manel Sòria Guerrero, professor del departament de física de la mateixa ESEIAAT. Per tant, l'estudi ha consistit en dur a terme el disseny dels elements auxiliars els quals comprenen un conjunt d'elements de seguretat passiva, sensometria i electrònica de control i emmagatzemament de dades.

Com que en un ambient universitari és habitual treballar amb coets de petita escala, la bancada està pensada per a adaptar-se a motors d'aquesta mida. En quant a la obtenció de dades, permet obtenir informació sobre l'impuls dels motors que es provin a partir de les lectures de força d'una cèl·lula de carrega (**FINS A 50 N D'EMPENTA**). La bancada no està adaptada per a obtenir dades de pressió i temperatura a l'interior de la cambra de combustió per a reduir la complexitat tant de la utilització de la pròpia bancada com del disseny dels motors.

A nivell de seguretat, la bancada presenta diverses mesures de protecció en el cas de que es doni un mal funcionament del motor durant les proves d'ignició. **És important seguir totes les indicacions que s'especifiquen en aquest document i prestar especial atenció als consells de seguretat.**

La guia detallada que s'adjunta a continuació pretén facilitar la utilització de la bancada a tota persona que ho requereixi (**SOTA CONSENTIMENT PREVI**). En aquesta s'especifica punt per punt els passos a seguir per a evitar possibles errors durant la realització de les proves estàtiques. Des de la subjecció del motor, la instal·lació de l'estructura i les proteccions, la configuració de l'electrònica, el procés d'ignició i la obtenció i tractament de les dades.

GUIA D'UTILITZACIÓ

Tots els documents necessaris per a la utilització de la bancada es troben al repositori de gitHub nomenat TFG-BANCADA-ESEIAAT. Cal descarregar els documents abans d'iniciar la guia de procediments. L'URL del repositori és el següent:

<https://github.com/jcostagarcia/TFG-BANCADA-ESEIAAT>

Material

- Ordinador amb connexió USB tipus A.
- Estructura de la bancada.
- Cèl·lula de càrrega.
- Electrònica (Arduino MEGA + Amplificador diferencial + ADC)
- Cable USB amb connexions A-B de 5 metres.
- 4 cargols M8 amb les corresponents volanderes.
- 6 cargols allen M4.
- 8 cargols allen M6 amb les corresponents femelles i 8 volanderes.
- Clau fixe de 13 mm.
- Clau allen de 4 mm.
- Clau allen de 6 mm.
- Subjeccions del motor (fins a 4 en funció de la llargada del motor).
- Protecció superior.
- Protecció posterior.
- Tanca de seguretat
- 2 cables d'ignició de 5 metres.
- Pila de 9V o bateria.
- Cinta adhesiva de doble cara.

Comprovacions prèvies

Comprovar que l'estructura de la bancada no presenti cap anomalia:

- Correcte funcionament dels rodaments lineals.
- Correcte adhesió del material ignífug.
- Correcte subjecció de la guia per a subjectar el motor (perfil tipus C).

Comprovar que el connexionat de l'electrònica sigui el correcte (no ha d'haver cables solts i aquests han de fer bon contacte). Es pot comprovar l'esquema de connexions dins de la memòria que s'adjunta al GitHub (apartat "Esquema de connexions" del document).

Comprovar que l'ordinador que s'utilitza per a fer la prova tingui instal·lat el següent programari:

- Arduino IDE (<https://www.arduino.cc/en/Main/Software>)
- PuTTY (<https://www.chiark.greenend.org.uk/~sgtatham/putty/latest.html>)

Procediment

Subjecció del motor

1. Col·locar el motor a la guia i en contacte amb la paret vertical per a que l'empenta es transmeti de la millor manera possible.

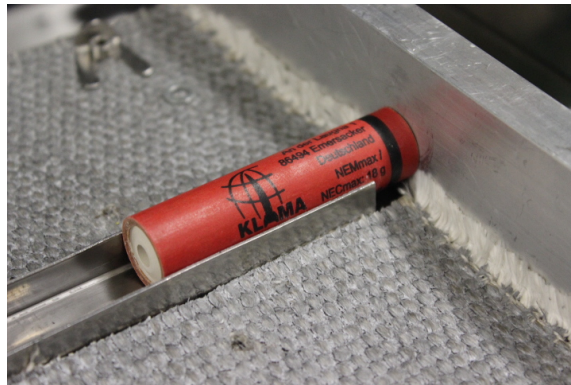


Figure 1: Motor col·locat a la guia.

2. Col·locar les subjeccions del motor i subjectar-les amb els cargols allen M6. En funció de la llargada del motor s'utilitzaran més o menys subjeccions. Per a les subjeccions es pot utilitzar una brida com la que es mostra a la figura 2 (existeixen diverses mides en funció del diàmetre del motor.).

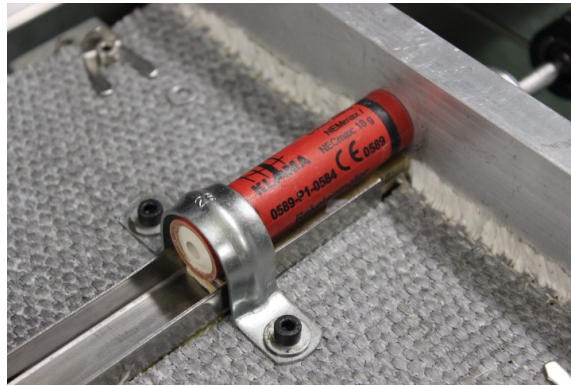


Figure 2: Motor subjectat a l'estructura.

3. Assegurar-se de que totes les unions cargolades estan ben subjectes.

Instal·lació de l'estructura i proteccions

4. Col·locar l'estructura a la zona habilitada amb els forats a terra a l'exterior del laboratori.



Figure 3: Zona habilitada.

5. Subjectar l'estructura a terra amb els cargols M8 i les corresponents volanderes. Utilitzar la clau fixe de 13 mm.



Figure 4: Subjecció de l'estructura a terra.

6. Subjectar la protecció superior amb els cargols M4. **Comprovar que queda ben subjecta.**

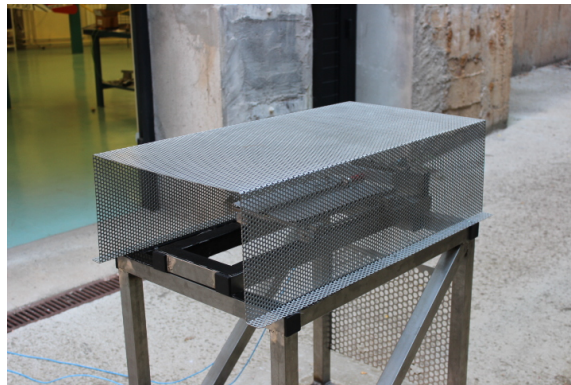


Figure 5: Protecció superior de la bancada.

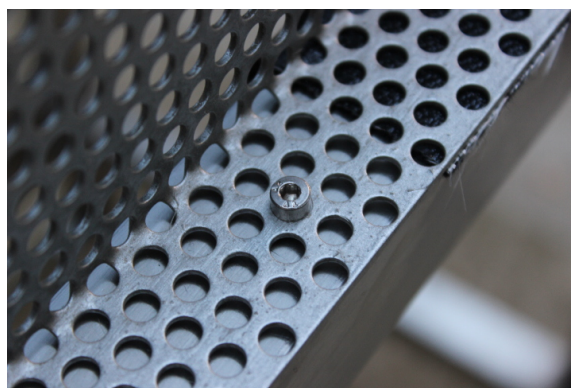


Figure 6: Unió de la protecció superior.

7. Col·locar la protecció posterior i bloquejar els frens de les rodes d'aquesta. Cal evitar que entri en contacte amb els gasos d'escapament però tampoc s'ha de col·locar a una distància excessiva.



Figure 7: Protecció posterior de la bancada.



Figure 8: Fre de la protecció posterior.

8. Col·locar la tanca de seguretat al inici del túnel per a restringir l'accés a on es situa la bancada. **Important per a evitar que hi hagi qualsevol persona aprop de la bancada durant la ignició.**



Figure 9: Tanca de seguretat.

Configuració de l'electrònica

9. Connectar la cèl·lula de càrrega a l'electrònica seguint l'esquema de connexions que s'especifica a continuació.

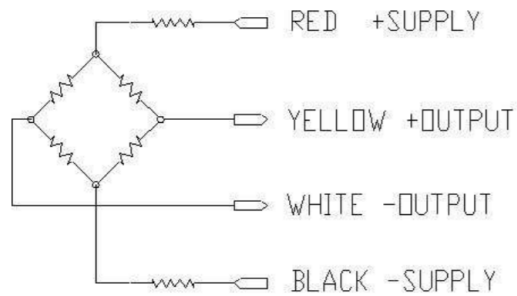


Figure 10: Esquema de cablejat de la cèl·lula de càrrega FX1901.

Arduino MEGA	
Vermell	5V
Negre	GND
Amplificador Diferencial	
Groc	AIN+
Blanc	AIN-

Table 1: Connexió de la cèl·lula de càrrega FX1901 a l'electrònica.

10. Unir amb cinta adhesiva de doble cara la cèl·lula de càrrega a l'estructura. Comprovar que hi hagi un bon contacte entre la part mòbil de l'estructura i la cèl·lula.

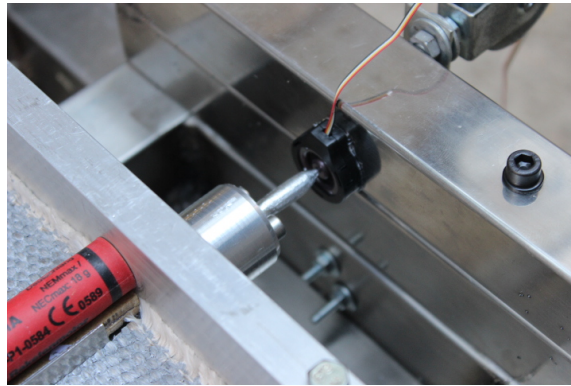


Figure 11: Cèl·lula de càrrega unida a l'estructura.

11. Connectar el cable USB per l'extrem de la connexió tipus B a la placa d'Arduino.
12. Passar el cable fins a l'interior del laboratori.
13. Connectar el cable USB per l'extrem de la connexió tipus A a l'ordinador.
14. Obrir a l'ordinador el programa Arduino IDE amb el codi del programa.
15. Comprovar que la configuració de la placa, el processador i el port sèrie és correcte. Seleccionar la configuració de la figura 12. La selecció del port dependrà del que s'estigui utilitzant en el moment.

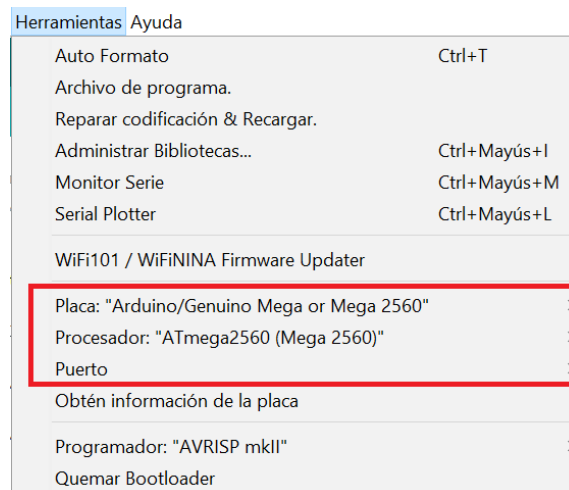


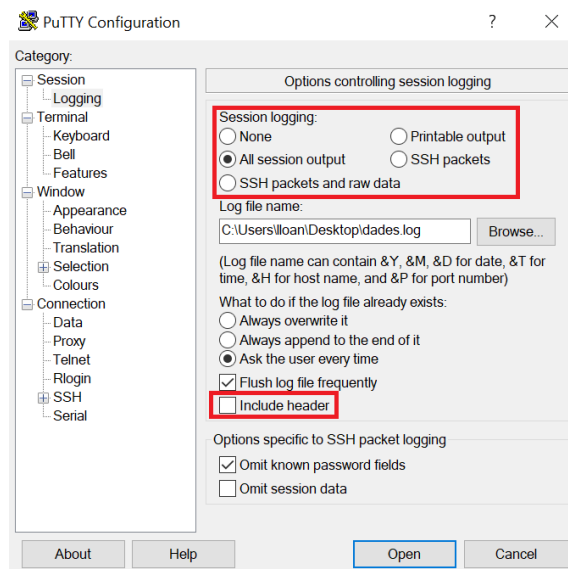
Figure 12: Configuració de la placa, el processador i el port sèrie.

16. Compilar i pujar el programa a la placa Arduino MEGA.

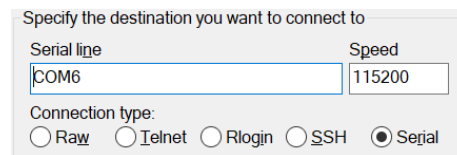


Figure 13: Pujar programa a la placa.

17. Tancar l'Arduino IDE i obrir el programa PuTTY.
18. Seleccionar l'apartat *logging* del marge esquerre.
19. Seleccionar *All session output* i deseleccionar *Include header* a l'apartat *Session logging*.

Figure 14: Configuració de l'apartat *logging*.

20. Seleccionar *Browse...* per a escollir la carpeta on es guarda l'arxiu amb les dades obtingudes. Es recomanable escollir la mateixa carpeta on s'ha guardat l'arxiu de MATLAB descarregat del GitHub. També es pot escollir el nom de l'arxiu, per exemple *dades*.
21. Seleccionar l'apartat *Session* del marge esquerre.
22. Seleccionar la opció *Serial* a l'apartat *Connection type*.
23. Definir el port sèrie que es vol llegir a l'apartat *Serial line* (dependrà del que s'estigui utilitzant en el moment) i els bauds a l'apartat *Speed* (ha de ser 115200 bits/s).

Figure 15: Configuració de l'apartat *Serial*.

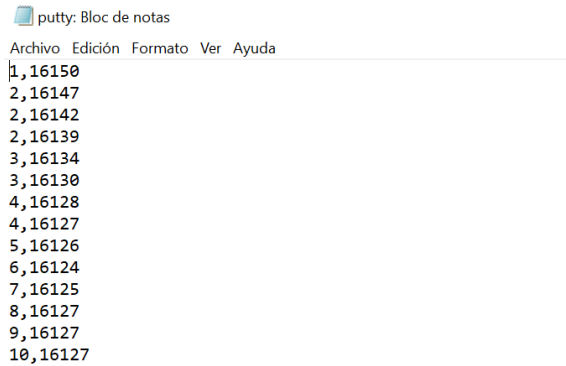
24. Seleccionar *Open* per a iniciar la obtenció de dades.
25. Aplicar força sobre la cèl·lula de càrrega i comprovar que s'aprecien variacions en les lectures d'empenta que es mostren per pantalla (segona columna).
26. Seleccionar la *X* de la finestra oberta per a finalitzar la obtenció de dades.
27. Comprovar que s'ha generat correctament l'arxiu *.log* amb les dades a la carpeta indicada.

Ignició i obtenció de dades

28. Col·locar l'ignitor al motor.
29. Unir un dels extrems de cadascun dels cables d'ignició a l'ignitor. Assegura-se de que els cables no es toquen entre ells una vegada units.
30. Passar els altres extrems dels cables d'ignició fins a l'interior del laboratori.
31. Realitzar una última comprovació de tots els components de seguretat i comprovar que no hi hagi persones dintre de la zona delimitada.
32. Tancar la porta del laboratori d'aeronàutica. **La ignició i la obtenció de dades es realitzen des de l'interior del laboratori amb la porta tancada.**
33. Obrir el programa PuTTY a l'ordinador. Comprovar que es manté la configuració anterior i pressionar *Open* per a iniciar la obtenció de dades.
34. Deixar passar un parell o tres de segons, aproximadament, i realitzar el curtcircuit a l'ignitor (connectar els cables de l'ignitor als dos pols de la pila o bateria).
35. Una vegada finalitzi la combustió, pressionar la *X* per a tancar la pestanya del programa PuTTY i finalitzar la obtenció de dades.

Tractament de dades

36. Obrir l'arxiu *.log* generat a través del programari PuTTY. La primera columna és el temps en milisegons i la segona l'empenta en lectura *raw*.
37. Eliminar totes les línies de text generades fins que a la primera columna aparegui un 1 milisegon.



```

Archivo Edición Formato Ver Ayuda
1,16150
2,16147
2,16142
2,16139
3,16134
3,16130
4,16128
4,16127
5,16126
6,16124
7,16125
8,16127
9,16127
10,16127

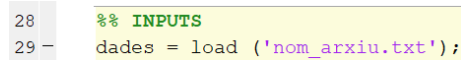
```

Figure 16: Eliminar línies de text.

38. Desar l'arxiu *.log* amb format *.txt* a la mateixa carpeta que el codi MATLAB.

Archivo → Guardar como... → Documentos de texto (*.txt).

39. Obrir el programari MATLAB amb el codi. Aquest permet imprimir les dades d'empenta de l'arxiu *.txt* de forma senzilla. **També es pot realitzar amb un programa de fulls de càlcul, com pot ser Excel, però no s'explica en aquesta guia.**
40. Comprovar que l'arxiu *.txt* es troba a la mateixa carpeta que l'arxiu *.m*.
41. Substituir *nom_arxiu.txt* pel nom de l'arxiu *.txt* generat a l'apartat INPUTS. **No eliminar la extensió *.txt*.**



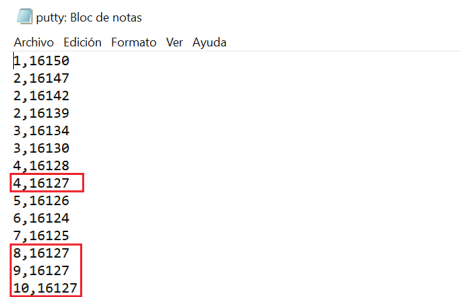
```

28 %% INPUTS
29 dades = load ('nom_arxiu.txt');

```

Figure 17: Introduir nom de l'arxiu *.txt* al codi.

42. Introduir l'*offset* que presenten les dades d'empenta a l'apartat INPUTS. Agafar el valor que més es repeteixi de les primeres línies de text de l'arxiu *.txt*. A continuació es mostra un exemple.



```

1,16150
2,16147
2,16142
2,16139
3,16134
3,16130
4,16128
4,16127
5,16126
6,16124
7,16125
8,16127
9,16127
10,16127

```

Figure 18: Introduir *offset* de les dades.

```
30 - offset = 16127;
```

Figure 19: Seleccionar *offset* de les dades al codi.

43. Introduir l'instant de temps inicial i final que es mostrarà al gràfic d'empenta a l'apartat INPUTS. S'ha d'introduir el valor del temps en milisegons que es mostra a l'arxiu *.txt*. Es recomana imprimir primer totes les dades i després restringir els marges de la gràfica.

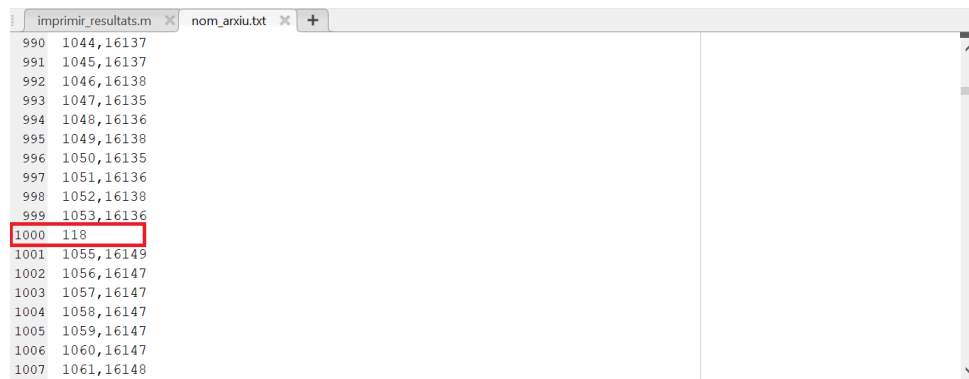
```
31 - t_inicial = 8700;
32 - t_final = 10500;
```

Figure 20: Seleccionar instants de temps inicial i final de la gràfica.

44. Seleccionar *Run* per a generar la gràfica. Si es dona el cas que salta l'error "Number of columns on line X of ASCII file nom_arxiu.txt must be the same as previous lines." cal eliminar la fila de l'arxiu *.txt* que s'indica (figures 21 i 22). Si s'obre l'arxiu directament des de MATLAB (doble clic) es mostra el número de cada una de les files a la part esquerra.

```
Error using load
Number of columns on line 1000 of ASCII file nom_arxiu.txt must be the same as previous lines.
```

Figure 21: Error en la impressió dels resultats.

Figure 22: Eliminar línia de l'arxiu *.txt*.

45. Finalment s'obté la gràfica per pantalla. Aquesta es pot desar amb el format que es desitgi.

Bibliografia

- [1] *Tejido ignífugo multicapa para soldadura WELD SX*. <https://texfire.net/es/tejidos-ignifugos/32-tejido-multicapa-weld-sx>, visitada el 2019-04-15.
- [2] *Table of material properties for structural steel S235*. <https://www.eurocodeapplied.com/design/en1993/steel-design-properties>, visitada el 2019-05-19.
- [3] *Load cell LCS-D1*. <http://www.smowo.com/en/index.php?m=product{&a=show{&id=83{&}}topid=115{&}}pid=135{&}}ispid=135>, visitada el 2019-04-29.
- [4] *Arduino Mega 2560 Rev3*. <https://store.arduino.cc/mega-2560-r3>, visitada el 2019-04-29.
- [5] *8 channel ADC module AD7606*. <https://www.plexishop.it/en/robotics-and-automation/converters-for-arduino/8-channel-adc-module-for-arduino-ad7606.html{#}>, visitada el 2019-04-29.
- [6] *Klima rocket motor D9-0*. <http://www.sierrafoxhobbies.com/es/klima-rocket-engines/1473-motori-klima-d9-0-4250595404936.html>, visitada el 2019-05-20.
- [7] *Compression Load Cell FX1901 SPECIFICATIONS*. Report tècnic. <https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchtrv{&DocNm=FX19{&}}DocType=DS{&}}DocLang=English>.
- [8] *Pipe burst working pressure calculator Barlow's formula*. <https://www.engineersedge.com/calculators/pipe{ }bust{ }calc.htm>, visitada el 2019-04-23.
- [9] *6060-T6 aluminum properties*. <https://www.makeitfrom.com/material-properties/6060-T6-Aluminum>, visitada el 2019-04-16.
- [10] *Cálculo de uniones atornilladas*. <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn32.html>, visitada el 2019-04-23.
- [11] Leidwanger, Yann: *Differential amplifier shield for Arduino Uno*. <https://www.tindie.com/products/Upsilon{ }Eng/differential-amplifier-shield-for-arduino-uno/>, visitada el 2019-04-29.
- [12] Mercadé, J. i L. Conangla: *Tractament de dades*. <http://epsem.upc.edu/{~}practiquesfisica/part2/presenta/inici.htm>, visitada el 2019-05-20.
- [13] *New recycling effort*, 2009. <https://www.kansascity.com/637/story/1509423.html>, visitada el 2019-06-01.

- [14] Buera, Luis: *No permitamos el apocalipsis electrónico*. Tesi de Doctorat, 2015.
- [15] *Perclorato de amonio*, 2006. http://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=1255&p_version=1&p_lang=es, visitada el 2019-06-01.